



IMAGINE

Gemeinsamer Schlussbericht

Berichtszeitraum: 01.09.2016 - 31.05.2022

Förderkennzeichen:	19A16003
Projektkoordination:	Opel Automobile GmbH
Fälligkeitsdatum:	30.11.2022
Erstellungsdatum:	31.10.2022
Veröffentlichung:	30.11.2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DOKUMENTENINFORMATION

PARTNER

Projektpartner	Förderkennzeichen
Opel Automobile GmbH (Konsortialleitung)	19A16003A
BMW AG	19A16003L
Continental Teves AG & Co. oHG	19A16003E
Die Autobahn GmbH des Bundes	19A16003H
IPG Automotive GmbH	19A16003D
MAN Truck & Bus SE	19A16003K
Mercedes-Benz AG	19A16003I
Nordsys GmbH	19A16003C
Robert Bosch GmbH	19A16003F
Technische Universität München	19A16003B
Volkswagen AG	19A16003J
Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH	19A16003G

PROJEKTKOORDINATION

Markus Bickel

Opel Automobile GmbH

65423 Rüsselsheim

Tel.: +49 (0) 6142-69-22916

E-Mail: markus.bickel@stellantis.com

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung	1
2 Kurzdarstellung	2
2.1 Aufgabenstellung	2
2.1.1 Vision und Gesamtzielsetzung	2
2.1.2 Einzelziele	5
2.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	15
2.3.1 Projektstruktur	15
2.3.2 Projektzeitplan	17
2.3.3 Kooperative Fahrfunktionen	17
2.3.4 Meilensteine und Deliverables	18
2.3.5 Gemeinsame Unteraufträge	19
2.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangslage	20
2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	21
2.5.1 European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	21
2.5.2 Car to Car Communication Consortium	22
3 Eingehende Darstellung	24
3.1 TP1: Analyse von Kooperationsszenarien	24
3.1.1 Zielsetzung	24
3.1.2 AP1.1: Einordnung kooperativer Funktionen	25
3.1.3 AP1.2: Use Case-Analyse	25
3.1.4 AP1.3: Harmonisierung der Anforderungen	29
3.1.5 Zielerreichung	33
3.2 TP2: Kooperative Funktionen und Systemarchitektur	33
3.2.1 Zielsetzung	33
3.2.2 AP2.1: Rahmenspezifikation System und Funktionen	34
3.2.3 AP2.2: Schnittstellen und Referenzimplementierung	48
3.2.4 AP2.3: Basis-Simulation und -Verifikation	51
3.2.5 AP2.4: MMI-Grundlagen	58
3.2.6 AP2.5: Spezifikation kooperativer Manöverabstimmung und Systemarchitektur	60
3.2.7 Zielerreichung	66
3.3 TP3: Kooperative Technologien	67
3.3.1 AP3.1: Kollektive Perzeption	67
3.3.2 AP3.2: Situationsadaptive Manöverplanung	72

3.3.3 AP3.3: Kommunikation	78
3.3.4 AP3.4: Technologieorientierte Simulation	90
3.3.5 AP3.5: Fahrsimulation und Fahrverhalten	95
3.3.6 Zielerreichung	99
3.4 TP4: System- und Fahrzeugintegration	100
3.4.1 Zielsetzung	100
3.4.2 AP4.1: Fahrzeugaufbau und Integrationsplan	101
3.4.3 AP4.2: Inbetriebnahme und Integration des IMAGinE-Basissystems	109
3.4.4 AP4.3: Inbetriebnahme und Integration der Umfeldmodelle	114
3.4.5 AP4.4: Inbetriebnahme und Integration der kooperativen Funktionen	120
3.4.6 Zielerreichung	129
3.5 TP5: Evaluierung und Erprobung	138
3.5.1 AP5.1: Definition, Konzepte, Methodik	140
3.5.2 AP5.2: Evaluation der Mensch-Maschine-Interaktion	142
3.5.3 AP5.3: Evaluation in der Simulation	147
3.5.4 AP5.4: Evaluation im Realfahrzeug	150
3.5.5 AP5.5: Dokumentation und Bewertung	153
3.5.6 AP5.6: Demonstration	157
3.5.7 Zielerreichung	161
3.6 TP6: Projektmanagement	162
3.6.1 AP6.1: Management und Koordination	162
3.6.2 AP6.2: Ergebnisverbreitung	164
3.6.3 Zielerreichung	174
4 Zusammenfassung	175
ANHANG 1: Literaturverzeichnis	178
ANHANG 2: Übersicht der öffentlichen Deliverables	179
ANHANG 3: Veröffentlichungen	180
ANHANG 4: Erstmalig in IMAGinE definierte Nachrichtenformate	185
4.1 Maneuver Coordination (MC) Service	185
4.1.1 Motivation und Beschreibung	185
4.1.2 Spezifikation und Profiling des Services	185
4.2 IMAGinE Driving Strategy (IDS) Service	203
4.2.1 Motivation und Beschreibung	203

4.2.2 Spezifikation und Profiling des Services	203
4.3 IMAGinE Traffic Distribution (ITD) Service	208
4.3.1 Motivation und Beschreibung	208
4.3.2 Spezifikation und Profiling des Services	208

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Partnerstruktur in IMAGinE.....	14
Abbildung 2:	Projektstrukturplan	15
Abbildung 3:	Projektzeitplan.....	17
Abbildung 4:	Die IMAGinE-Funktionen im Überblick.....	18
Abbildung 5:	Übersicht der Projektmeilensteine.....	19
Abbildung 6:	Arbeitsstruktur des TP1	24
Abbildung 7:	Übersicht der IMAGinE-Kooperationsfähigkeitsstufen	25
Abbildung 8:	Funktionsbaum für Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen.....	26
Abbildung 9:	„Big Picture“ der Funktion F1	27
Abbildung 10:	Interaktionsdiagramme für die Phase Sensierung & Umfeldmodellierung	27
Abbildung 11:	Visualisierung in SILAB.....	28
Abbildung 12:	Kooperationsraum aus Fahrersicht	31
Abbildung 13:	Klassifizierung der Use Cases.....	32
Abbildung 14:	Arbeitsstruktur von TP2.....	34
Abbildung 15:	Architekturentwurf für die Funktion F1	36
Abbildung 16:	Ablaufschritte des kontinuierlichen Konzepts aus Fahrzeugsicht	39
Abbildung 17:	Frenet-basierte Variante für die Darstellung von Trajektorien.....	40
Abbildung 18:	Verteilte Zustände für Staufolgefahrt	42
Abbildung 19:	Verteilter Zustandsautomat für die Funktion F6.....	42
Abbildung 20:	Interaktionen zwischen den Fahrzeugen bei der Funktion F4	43
Abbildung 21:	Entwicklungsstufe 1 für das gemeinsame IMAGinE-Umfeldmodell.....	45
Abbildung 22:	In AP2.1 erarbeitete erste verfeinerte Systemarchitektur.....	47
Abbildung 23:	IMAGinE Systemarchitektur	50
Abbildung 24:	Exemplarisches Szenario für die Funktion F1 – initialer Zustand	53
Abbildung 25:	Exemplarisches Szenario für die Funktion F1 – finaler Zustand	53
Abbildung 26:	Exemplarische Konfiguration der IMAGinE-Simulationsumgebung.....	54
Abbildung 27:	Beispielhafte GUA1-Ergebnisse	57
Abbildung 28:	Referenzarchitektur für kooperatives Fahren in IMAGinE	61
Abbildung 29:	Systemarchitektur des IMAGinE-Systems	68
Abbildung 30:	Grundlegende Komponenten des IMAGinE-Umfeldmodells	69
Abbildung 31:	Kooperatives Umfeldmodell.....	71
Abbildung 32:	Architektur der Manöverplanung und -abstimmung im Überblick.....	75
Abbildung 33:	Module der taktischen bzw. operativen Manöverplanung und -abstimmung .	75
Abbildung 34:	Module der Architektur.....	78
Abbildung 35:	In IMAGinE eingesetzte Kommunikationshardware waveBEE	81
Abbildung 36:	Kommunikation zwischen Geoserver und Fahrzeugen	82
Abbildung 37:	Funktionsprinzip des Geoservers	83

Abbildung 38: Betrachtung der Kanallast	85
Abbildung 39: Simulationsumgebung.....	86
Abbildung 40: Szenario 1 – Frankfurter Kreuz	86
Abbildung 41: Szenario 2 – Ko-PER-Kreuzung in Aschaffenburg	87
Abbildung 42: Szenario 3 – T-Kreuzung zweier Landstraßen.....	87
Abbildung 43: Architektur Support Server.....	89
Abbildung 44: Datenübertragung Funktion F4	90
Abbildung 45: Abstrahierte Darstellung der IMAGinE-Simulationsarchitektur	92
Abbildung 46: Simulation mit drei IMAGinE-Fahrzeugen	93
Abbildung 47: Unterschiedliche Anwendungsfälle der IMAGinE-Simulationsumgebung	94
Abbildung 48: Übergeordnete IMAGinE-Architektur mit Schnittstellenbezeichnungen.....	103
Abbildung 49: Grobe Einordnung des Framework 2 Framework Gateway	107
Abbildung 50: PlotJuggler	111
Abbildung 51: CAM-Integration beim Integrationsworkshop in Frankfurt	112
Abbildung 52: Darstellung der CAMs in der Simulationsumgebung	113
Abbildung 53: IMAGinE-Umfeldvisualisierungstool.....	117
Abbildung 54: Objektdarstellung in der IMAGinE-Visualisierung im Fahrzeug	118
Abbildung 55: Objektdarstellung in der IMAGinE-Visualisierung im Fahrzeug	119
Abbildung 56: Objektdarstellung in der IMAGinE-Visualisierung.....	119
Abbildung 57: Trajektorienvisualisierung in der IMAGinE-Visualisierung	123
Abbildung 58: Manöverplanungsalgorithmik am Beispiel F5	127
Abbildung 59: Sicht aus Ego-Fahrzeug bei Fahrversuchen zur Funktion F1	127
Abbildung 60: Arbeitsstruktur des TP5	138
Abbildung 61: TRIWO-Testcenter Pferdsfeld bei der Abschlussveranstaltung	142
Abbildung 62: Abschlussveranstaltung auf dem TRIWO-Testgelände in Pferdsfeld	161
Abbildung 63: Konsortialtreffen 2017 in Garching	164
Abbildung 64: IMAGinE-Kerninnovationen.....	168
Abbildung 65: Kooperative Funktionen in IMAGinE	168
Abbildung 66: Homepage der IMAGinE-Website	169
Abbildung 67: IMAGinE-Kick-off am 29./30.11.2016 in Renningen.....	170
Abbildung 68: Abschlussveranstaltung am 19.05.2022 in Pferdsfeld	173
Abbildung 69: Informationsmaterial zum Projektabschluss.....	174
Abbildung 70: Struktur der Maneuver Coordination Message.....	186
Abbildung 71: Struktur der IMAGinE Driving Strategy Message	204
Abbildung 72: Struktur der IMAGinE Traffic Distribution Message.....	208

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Zuordnung der Einzelziele zu den Schwerpunkten.....	9
Tabelle 2:	Beiträge zum NFTS-Fachprogramm	10
Tabelle 3:	Übersicht der gemeinsamen Unteraufträge.....	20
Tabelle 4:	Sensierungsbereich der einzelnen Funktionen	30
Tabelle 5:	Zentrale Softwarekomponenten der IMAGinE-Simulationsumgebung.....	55
Tabelle 6:	Zusammenfassung der in IMAGinE verwendeten kooperativen Manöverabstimmungsansätze	63
Tabelle 7:	Übersicht der in AP3.5 durchgeführten Studien	97
Tabelle 8:	Abkürzungen in der IMAGinE-Architektur.....	104
Tabelle 9:	Ausstattung der Partnerfahrzeuge	108
Tabelle 10:	Übersicht der Funktionen und der jeweils beteiligten Partner	121
Tabelle 11:	Übergeordnete Testinhalte der Integrationstests.....	128
Tabelle 12:	Liste der Integrations- und Simulationsworkshops im Rahmen von TP4	130
Tabelle 13:	Studienüberblick aus AP5.2	143
Tabelle 14:	Übersicht der Funktionen und der beteiligten Partner in der Simulation.....	148
Tabelle 15:	Übersicht der Funktionen und der beteiligten Partner im Realfahrzeug	151
Tabelle 16:	Elemente der IMAGinE-Projektidentität.....	166
Tabelle 17:	Visualisierung der IMAGinE-Kerninnovationen	167

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Begriff
ADTF	Automotive Data and Time-Triggered Framework
AEV	Approaching Emergency Vehicle (Einsatzfahrzeugwarnung)
API	Application Programming Interface
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
C2C-CC	CAR 2 CAR Communication Consortium
CAM	Cooperative Awareness Message
CPM	Collective Perception Message
CPS	Collective Perception Service
COM	Kommunikationsmodul: Schnittstelle zur waveBEE
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
EEBL	Emergency Electronic Break Light (Notbremsung)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F	Kooperative Funktion
F1	Funktion 1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen
F2	Kooperative Längsführung auf Autobahnen
F3	Kooperatives Überholen auf Landstraßen
F4	Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung
F5	Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen
F6	Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen
FET	Funktionsentwicklungsteam
FGW	Framework2Framework Gateway
GPS	Global Positioning System
gPTP	generalized Precision Time Control
GUA	Gemeinsamer Unterauftrag
GUA1	Gemeinsamer Unterauftrag 1: Erstellung und Verifikation von Software zur kooperativen Durchführung von Fahrmanövern
GUA2	Gemeinsamer Unterauftrag 2: Erstellung und Verifikation von Software zur Haltung und Verarbeitung von Fahrzeugdaten aus verschiedenen Quellen in einem Umfeldmodell
GUA3	Gemeinsamer Unterauftrag 3: Framework Support

Abkürzung	Begriff
GUA4	Gemeinsamer Unterauftrag 4: Untersuchung des Kommunikationskanals beim Austausch von Manöver-Koordinierungsnachrichten
GUA5	Gemeinsamer Unterauftrag 5: Entwicklung eines LTE-basierten infrastrukturlosen Proximity Service
GUA6	Gemeinsamer Unterauftrag 6: Anmietung und Einrichtung Testgelände
GUA7	Gemeinsamer Unterauftrag 7: Kartierung Testgelände
GUA8	Gemeinsamer Unterauftrag 8: Projektbüro für Projektmanagement
GUA9	Gemeinsamer Unterauftrag 9: Projektbüro für Ergebnisverbreitung
GUI	Graphical User Interface
HUD	Head-Up Display
ID	IMAGinE Debug Service
IDL	Interface Description Language
IDSM	IMAGinE Driving Strategy Message
IKS	IMAGinE_Kooperationsfähigkeitsstufen
ITDM	IMAGinE Traffic Distribution Message
ITS	Intelligent Transportation Systems
IRS	ITS Roadside Station
IVI	In-Vehicle Information
IVS	Intelligent Vehicle Station
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
KOP	Kooperative Manöverplanung und -abstimmung
L2	Level 2 (automatisiertes Fahren)
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)
MCM	Maneuver Coordination Message
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MS	Projekt-Meilenstein
MS1	Meilenstein 1: Rahmenspezifikation abgeschlossen
MS2	Meilenstein 2: Hauptkomponenten entwickelt
MS3	Meilenstein 3: Fahrzeugintegration abgeschlossen
MS4	Meilenstein 4: Evaluation und Demonstration abgeschlossen
MS5	Meilenstein 5: Projektkonzept adaptiert
NDS	Navigation Data Standard
NTP	Network Time Protocol

Abkürzung	Begriff
OMNesT++	Objective Modular Network Testbed in C++
PiL	Prototype-in-the-Loop
ROS	Robot Operating System
SDK	Software Development Kit
SUMO	Simulation of Urban MObility
SUPS	Strategischer Support Server
SVA	Stationary Vehicle Ahead (liegendebliebenes Fahrzeug)
SYS	Systemgestaltung
UDP	User Datagram Protocol
UEQ	User Experience Questionnaire
UMF	Kooperatives Umfeldmodell
V2I	Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation
V2V	Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation
V2X	Fahrzeug-zu-Verkehrsnetz-Kommunikation (vehicle-to-everything)
Veins	Vehicles in Network Simulation
VHB	Vorhabenbeschreibung
ViL	Vehicle-in-the-Loop

1 EINLEITUNG

Im Verbundprojekt IMAGinE (Intelligente Manöver Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit) arbeiteten von September 2016 bis Mai 2022 zwölf Partner aus Automobilindustrie, Forschung und Verwaltung an der Entwicklung neuer, innovativer Assistenzsysteme für das kooperative Fahren der Zukunft. Durch die Kommunikation von Fahrzeugen zur gemeinsamen Abstimmung von Fahrmanövern wird der Verkehrsfluss optimiert, damit Verkehrsteilnehmer sicherer, effizienter und entspannter an ihr Ziel kommen und so die Vision des unfallfreien Fahrens Realität werden kann.

Fahrerinnen und Fahrer werden zunehmend durch technische Systeme unterstützt, die sicherheitsrelevante Empfehlungen direkt an sie kommunizieren oder selbst deren Umsetzung übernehmen. Dabei findet bisher kein Abgleich der Empfehlungen oder Handlungen zwischen verschiedenen Fahrzeugen statt und sie werden auch nicht aufeinander abgestimmt. Um diese Lücke zu schließen, wurden im Forschungsprojekt IMAGinE die Grundlagen für eine kooperative Manöverplanung sowohl zwischen Fahrzeugen als auch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur erforscht und herstellerübergreifende Systeme entwickelt, die nun implementiert werden können.

Das Projektteam untersuchte fünf Themenbereiche: Kooperative Manöverabstimmung, Kooperatives Umfeldmodell, Kommunikationsmechanismen, Mensch-Maschine-Interaktion und Simulationsumgebung. Alle entwickelten IMAGinE-Systeme erwiesen sich als funktionsfähig für die Mobilität von morgen, womit ein wichtiger Meilenstein zum kooperativen Fahren der Zukunft erreicht werden konnte.

Der vorliegende gemeinsame Schlussbericht gibt einen Überblick über die Hauptaktivitäten während der Projektlaufzeit, gewonnene Erfahrungen und Erkenntnisse sowie Kernergebnisse. Im Kapitel Kurzdarstellung werden zunächst die Projektziele, die wissenschaftliche und technische Ausgangssituation sowie Planung und Ablauf des Vorhabens vorgestellt. Im Kapitel Eingehende Darstellung werden die Arbeiten, Vorgehensweisen und Ergebnisse strukturiert nach Teilprojekten (TP) und Arbeitspaketen (AP) dargestellt. Zum Abschluss werden die wichtigsten Entwicklungen im Projekt zusammengefasst (Kapitel Zusammenfassung).

2 KURZDARSTELLUNG

2.1 Aufgabenstellung

2.1.1 Vision und Gesamtzielsetzung

Das Führen von Fahrzeugen bleibt auch im 21. Jahrhundert eine anspruchsvolle Aufgabe. Zu jedem Zeitpunkt ist in jeder Situation Sicherheit zu gewährleisten. Das wachsende Verkehrsvolumen in Deutschland und Europa erfordert dabei im Verkehrsalltag häufig, dass der knapp verfügbare Verkehrsraum von den Fahrzeugen möglichst effizient genutzt wird. Das Miteinander unterschiedlich ausgestatteter Fahrzeuge, die in unterschiedlichen Automatisierungsgraden unterwegs sind, wird in Zukunft neue Herausforderungen stellen.

Ausgangslage

Zur Unterstützung des Fahrers wurden in den vergangenen Jahrzehnten anspruchsvolle technische Assistenzsysteme erforscht, gefördert und zu hoher Reife entwickelt. Viele Systeme sind bereits auf dem Markt. Sie leisten einen hervorragenden Beitrag, damit Fahrer die Dynamik von Fahrzeug und Verkehr einfacher beherrschen können. Dadurch können sie sich von der Dauerbeanspruchung durch einzelne Fahraufgaben teilentlasten und frühzeitig auf bekannte Gefahren ebenso hingewiesen werden wie auf Unachtsamkeit und drohendes Fehlverhalten in Akutsituationen. In aktuellen Forschungsprojekten wird im Rahmen des „hochautomatisierten Fahrens“ intensiv daran gearbeitet, dass Fahrzeuge die Fahrzeugführung innerhalb geeigneter Szenarien vollständig selbst übernehmen können. Die permanente Aufmerksamkeit technischer Systeme bietet dabei großes Potenzial, um den hohen Anteil der Unfälle zu reduzieren, die durch menschliche Unachtsamkeit und Ablenkung verursacht werden.

Trotz dieser positiven Perspektive darf nicht übersehen werden, dass menschliche Fahrer über zentrale Leistungsmerkmale verfügen, die bislang verfügbare technische Systeme nicht oder nur unzureichend aufweisen. Menschliche Fahrer können durch ihr Verhalten für einen reibungslosen Verkehr sorgen.

Kommunikation und Kooperation sind zentrale Erfolgsfaktoren für das Handeln im Verbund. Für das Zusammenwirken von Verkehrsteilnehmern gilt das in besonderem Maße. Die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern wird sowohl über direkte Signale wie Blinker, Handzeichen, Hupe und Lichthupe, vor allem aber auch über indirekte Signale hergestellt, etwa durch die Art der Fahrzeugführung, das Öffnen und Schließen von Lücken zum vorausfahrenden Fahrzeug, Bremsen oder Beschleunigen, die Wahl der Querposition und gezieltes Lenken, um Manöver anderer Verkehrsteilnehmer zu unterstützen oder zu verhindern. Verkehrsverhalten und Verkehrsrisiken entstehen im Wechselspiel des Grades der Kooperationsbereitschaft.

Heutige technische Systeme können viele dieser Signale nicht interpretieren. Sie errechnen unabhängig voneinander sicherheits- und regelungsorientierte Empfehlungen an den Fahrer oder sie übernehmen deren (teil-)automatisierte Umsetzung selbst. Die Kompatibilität der Empfehlungen oder Handlungen wird zwischen den Fahrzeugen nicht abgestimmt. Auf entstehende

Konflikte wird situativ reagiert, entweder vom System selbst oder vom Fahrer durch rechtzeitiges Übersteuern. Erfolgen Reaktionen nicht rechtzeitig entstehen kritische Fahrsituationen. Diese können zu Störungen im Verkehrsablauf oder zu Unfällen führen, die durch aktive Kooperation vermieden würden.

Dem beobachteten Kommunikationsdefizit konventioneller Assistenzsysteme steht die Tatsache gegenüber, dass Kommunikationsmöglichkeiten und Vernetzungsgrad der Fahrzeuge ständig steigen. Sie schaffen damit Potenzial für die weitere Verbesserung von Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz. Dies sollte in IMAGinE genutzt werden.

IMAGinE - die Vision

IMAGinE sah sich als Wegbereiter für eine proaktive Unterstützung des unfallfreien Fahrens und die Optimierung des Verkehrsflusses. Vision des IMAGinE-Konsortiums war es, das **kooperative Fahren** in künftigen vernetzten Fahrzeugen entscheidend zu unterstützen. Dies sollte auf der Basis aktuell verfügbarer Kommunikationstechnologien geschehen. Sie sollten zukünftig einen leistungsfähigen Informationsaustausch sowohl zwischen Fahrzeugen untereinander als auch mit der Infrastruktur ermöglichen, um beabsichtigte Manöver so früh wie möglich mit den betroffenen Umgebungsfahrzeugen abzustimmen. Die kommunikationsbasierte Abstimmung von Fahrmanövern sollte einen Qualitätssprung für die vorbeugende Unterstützung unfallfreien Fahrens ebenso wie für die Optimierung des Verkehrsflusses ermöglichen, um sicherer, effizienter und entspannter ans Ziel zu kommen.

Zielsetzung

Ziel des Verbundprojekts war die **Entwicklung neuer Assistenzsysteme entlang der Prinzipien kooperativen Verhaltens**. Zum einen sollte der erforderliche wechselseitige Austausch zwischen kooperierenden Fahrzeugen technisch realisiert werden. Zum anderen sollte die Abstimmung und Entscheidungsfindung zwischen intelligenten Systemen sowie zwischen Mensch und Maschine dargestellt werden.

IMAGinE schlug die Brücke von Intelligenter Manöver-Assistenz zu Intelligenter Manöver-Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit.

Das zentrale Motto von IMAGinE für Assistenz und Automatisierung lautete: **„Erst reden, dann handeln.“**

Zentrale Herausforderung von IMAGinE war es, den Sprung vom informativen oder reagierenden Charakter heutiger isoliert agierender Assistenzsysteme hin zu kooperativen Manövern mehrerer Verkehrsteilnehmer darzustellen. Des Weiteren sollte eine fundierte technische Basis für eine umfängliche Entfaltung des Kooperationspotenzials zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur in der Zukunft geschaffen werden. Frühzeitige kooperative Gefahrenvermeidung, bereits bei der Planung von Manövern, stellte einen entscheidenden Schritt auf dem Weg zum unfallfreien und automatisierten Fahren dar.

Auch in einer stärker automatisierten Welt bleiben die Prinzipien kooperativen Verhaltens bestimmend für Sicherheit und Effizienz im Verkehr. In den kommenden Jahrzehnten wird zunehmend der gemischte Verkehr unterschiedlicher Automatisierungsgrade den Verkehrsalltag bestimmen. Automatisierte Systeme werden sich aus Sicherheitsgründen tendenziell defensiver als der menschliche Durchschnittsfahrer verhalten. In bestimmten Situationen sind automatisierte Systeme deshalb noch stärker auf das kooperative Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer angewiesen. Wenn in Zukunft das Potenzial schneller automatisierter Reaktionen für die Steigerung der Transportkapazität des Straßennetzes weiter ausgereizt wird, steigen die Anforderungen an das kooperative Zusammenwirken der beteiligten Fahrzeuge weiter an. Automatisierung erfordert verstärkte Kooperation.

Schwerpunkte

Zentrales Ziel von IMAGinE war es, kooperatives Fahren von Fahrern und technischen Systemen durch kooperative Funktionen zu unterstützen. Kooperatives Fahren bezeichnet dabei ein Verhalten im Straßenverkehr, bei dem sich die Verkehrsteilnehmer gegenseitig durch geeignete Anpassung des eigenen Fahrverhaltens geplante oder von außen induzierte Manöver ermöglichen, erleichtern oder unterstützen. Kritische Situationen können vermieden oder entschärft werden.

Dafür waren anspruchsvolle Zielsetzungen in drei Schwerpunktbereichen erforderlich:

1. Technologie
2. Interaktion
3. Verkehrsleistung und Sicherheit

1. Technologie

Notwendige Voraussetzung für die Ausschöpfung des IMAGinE-Potenzials war die weite Verfügbarkeit und breite Nutzung eines herstellerübergreifend operierenden Kommunikationsnetzwerkes, das einen ausreichend schnellen Informationsaustausch sowohl direkt zwischen den Fahrzeugen als auch über verfügbare Infrastruktur ermöglicht. Ein hybrider Kommunikationsansatz bezieht möglichst viele Fahrzeuge sowie vorhandene und künftige Infrastruktur in das kooperative Fahren ein.

Der neue Ansatz von IMAGinE nutzte Kommunikationstechnologien in Echtzeit und versetzte so Fahrzeuge in die Lage, Informationen über Objekte, die von fahrzeugeigenen Sensoren erfasst werden, mit anderen Fahrzeugen auszutauschen. Damit ließen sich Erfassungslücken schließen, die ansonsten durch mangelnde Ausstattung, begrenzte Sensorreichweite, Abschattungen oder physikalische Grenzen der Sensoren gegeben sind. Dieses „Kollektive Perzeption“ genannte Prinzip schaffte ein ausreichendes, gemeinsames Situationsverständnis, das der Manöverabstimmung zugrunde gelegt wurde.

2. Interaktion

Um das Ziel, in knapper Zeit sichere Entscheidungen zu ermöglichen, vorzubereiten, waren geeignete Interaktionsmechanismen zwischen den kooperierenden Fahrzeugsystemen einerseits

und – im Falle des assistierten Fahrens – zwischen Assistenzsystem und Fahrer andererseits zu schaffen. Dafür mussten existierende Mechanismen der Kooperation analysiert und ausgebaut sowie technische Systeme zu kooperativen Handlungen befähigt werden. Wichtig war, dass die Akzeptanz, Verantwortung und Kontrolle des aktiven Fahrers erhalten und gestärkt wird, weshalb intuitive Konzepte der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) entwickelt werden mussten. Auf diese Weise sollte der Mensch im kooperativen Fahrzeug optimal unterstützt werden. Manöverabbrüche und Manöverübersteuerungen sowie die begründete oder unbegründete Missachtung von Empfehlungen und kurzfristigen Situations- und Planänderungen waren bei der Entwicklung eines Funktionsdesigns für verbesserte Interaktion zu berücksichtigen.

3. Verkehrsleistung und Sicherheit

Unter Verkehrsleistung wird allgemein die Verkehrsarbeit pro Zeit verstanden. Verkehrsarbeit ist definiert als das Produkt aus der Summe aller Verkehrsteilnehmer und der von ihnen zurückgelegten Strecke. IMAGinE brachte mit den kooperativen Funktionen einen neuen Ansatz, von dem erwartet wurde, dass die Verkehrsleistung durch die effizientere Abwicklung abgestimmter Fahrmanöver im Vergleich zu bisherigen V2X-Technologien noch weiter gesteigert werden kann. Die Auswirkungen kooperativer Funktionen auf die Verkehrsleistung sollten daher mittels adäquater Simulationssysteme untersucht werden.

2.1.2 Einzelziele

Die in IMAGinE entwickelten kooperativen Technologien „Kollektive Perzeption“, „Kooperative Manöverplanung“ und „Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) für kooperative Funktionen“ umfassten komplett neue Forschungsbeiträge für eine fahrzeugübergreifende Manöverplanung, die auf einem neuen technologischen Ansatz zur V2X-Kommunikation basieren. Bisherige V2X-Technologien kommunizierten unidirektional und nutzten dabei lediglich Informationen über das sendende Fahrzeug sowie von ihm detektierte Ereignisse. IMAGinE hingegen entwickelte eine bilaterale bzw. multilaterale Abstimmung von Fahrmanövern. Ferner entwickelte IMAGinE ein validiertes und abgestimmtes Konzept für die erweiterte Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds durch indirekte Detektion von Fahrzeugen, die weder mit V2X ausgestattet sind noch direkt vom Ego-Fahrzeug detektiert werden können. Methoden zur indirekten Perzeption und indirekten Sensorfusion wurden erstmalig im Kooperationsprojekt Ko-Per erforscht. Über Ko-Per hinaus erforschte IMAGinE die Entwicklung und Anwendung neuer ressourcenschonender Übertragungsprotokolle über verfügbare Kommunikationskanäle, um indirekte kollektive Perzeption für die fahrzeugübergreifende Manöverplanung konkret einzusetzen. Zudem entwickelte IMAGinE die technologische Basis für kooperatives Verhalten neuartiger Fahrerassistenzsysteme. Um auch den Fahrer in die Kooperation mit einzubinden, ist ein neuartiges MMI-Konzept notwendig, das ebenfalls im Rahmen von IMAGinE entwickelt wurde. Mit diesen kooperativen Technologien zielte IMAGinE auf die weitere Steigerung der Verkehrssicherheit und -effizienz sowie den Fahrkomfort gegenüber den Day-One-Funktionen ab, wie sie entsprechend des Memorandum of Understanding des Car 2 Car Communication Consortium eingeführt werden sollten. [1] [2]

Dieses Ziel wurden durch die Erforschung und Definition neuer Nachrichtenformate und Kommunikationsprotokolle für kollektive Perzeption, Intention und kooperative Manöverplanung erreicht. Zudem wurde die Einbindung des Fahrers erforscht und MMI-Konzepte für kooperative Funktionen erarbeitet. Diese Konzepte wurden sowohl in einer Simulation als auch als Implementierung im Realfahrzeug realisiert. Der Nachweis der Validität dieser Konzepte wurde anhand beispielhafter kooperativer Funktionen durchgeführt. Zur Erreichung der Gesamtzielsetzung verfolgte IMAGinE verschiedene technische und nicht-technische Einzelziele (die folgende Aufzählung stellt keine Priorisierung dar):

- Mechanismen der Kooperation analysieren und definieren
- Technische Systeme zu kooperativen Handlungen befähigen
- Kommunikationstechnologien für Abstimmung in Echtzeit nutzen
- Funktionsdesign für sichere Interaktion entwickeln
- Den Menschen im kooperativen Fahrzeug optimal unterstützen
- Die Auswirkungen kooperativer Funktionen auf die Verkehrsleistung einschätzen
- Unterschiedliche Ansätze und Konzepte zur Manöverabstimmung entwickeln und die Machbarkeit der entsprechenden IMAGinE-Systeme demonstrieren
- Die Ergebnisse des Projektes kommunizieren

Mechanismen der Kooperation analysieren und definieren

Kooperative Systeme müssen miteinander interagieren. Es war daher notwendig, die Formen und Mechanismen dieser Interaktion zu verstehen und zu definieren, was in IMAGinE darunter verstanden werden sollte. Bei den kooperativen Interaktionsformen ging es vorrangig darum, Kompatibilität und Interoperabilität zwischen den Kooperationspartnern innerhalb eines Manöverabstimmungsverfahrens herzustellen. Um dieses Ziel zu realisieren, mussten zuerst Methoden konzipiert werden, die das Auffinden von Kooperationspartnern ermöglichen. Zwischen diesen Partnern fand dann ein kooperatives Aushandeln der Manöver im laufenden Verkehr statt. Dies geschah in unterschiedlichen Verkehrssituationen unter Einbeziehung verschiedener Verkehrsteilnehmer wie Pkw und Lkw, was spezifische Neuerungen mit sich brachte.

Technische Systeme zu kooperativen Handlungen befähigen

Die Fähigkeit zur Kooperation stellt zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern einen integralen Bestandteil der Teilnahme am Straßenverkehr dar. Bei technischen Systemen ist die Fähigkeit zur Kooperation a priori nicht selbstverständlich. Auf dem Weg zur Einbindung technischer Systeme in kooperatives Handeln ist die Kommunikation über V2X ein wichtiger Bestandteil. IMAGinE fasste die V2X-Einheit als zusätzlichen Sensor des technischen Systems auf. Wie jeder Sensor verbessert V2X die Interpretation des Umfeldes. Hierzu musste ein neues gemeinsames IMAGinE-Umfeldmodell für die kollektive Perzeption entwickelt werden, das in jedem Fahrzeug integriert wurde und die partnerspezifischen Anbindungen einbeziehen konnte. Dies erforderte

geeignete Nachrichten an andere Verkehrsteilnehmer, um durch Informationsaustausch das Wissen über das Umfeld gegenseitig zu ergänzen. Eine wesentliche Herausforderung wurde durch das Vorhandensein von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden erwartet.

Kommunikationstechnologien für Abstimmung in Echtzeit nutzen

Für einen Realbetrieb, in dem auf hochdynamische Verkehrsszenarien reagiert werden muss, ist ein echtzeitfähiges System nötig. Im Projekt sollte daher ein echtzeitfähiges Rahmensystem für kooperatives Fahren erstellt werden. Die zur Abstimmung kontextbezogener Kommunikation notwendigen Nachrichten und geeigneten Kommunikationsprotokolle wurden erstmalig konzipiert und implementiert. Sie konnten im Rahmen des hybriden Kommunikationsansatzes sowohl über ITS-G5 als auch über Mobilfunk genutzt werden. Die IMAGinE-Versuchsträger wurden mit beiden Technologien ausgerüstet und konnten sie für IMAGinE-Funktionen einsetzen.

Funktionsdesign für sichere Interaktion entwickeln

Zahlreiche Fahrerassistenzfunktionen basieren auf kooperativen Technologien oder können von ihnen profitieren. Als Erweiterung bestehender Fahrerassistenzsysteme wurden in IMAGinE insbesondere fahrerrelevante Funktionen umgesetzt. Im Projekt wurden Strategien entwickelt, die als gemeinsame Grundlage für abgestimmte Fahrmanöver dienen und die intuitive Interaktion mit dem Fahrer bereits im Funktionsdesign berücksichtigten.

Den Menschen im kooperativen Fahrzeug optimal unterstützen

Bei den zahlreichen, technischen Fragestellungen durfte der eigentliche Zweck des Systems, den Fahrer optimal zu unterstützen, nicht aus den Augen verloren werden. Dies war insbesondere vor dem Aspekt der Systemakzeptanz wichtig. Häufig bestand bereits eine Kooperationsbereitschaft, die zunächst erkannt werden musste, um sie anschließend so zu unterstützen, dass unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen optimaler Nutzen erzielt wurde. Dabei konnten unter der Prämisse „Mensch bleibt souverän“ Akzeptanzgrenzen der Kooperation ermittelt werden. Unter Berücksichtigung dieser Akzeptanzgrenzen ließen sich auch Mechanismen zur Steigerung der Kooperationsbereitschaft identifizieren und umsetzen. Zu ihrer Bewertung wurden entsprechende Metriken für die Qualität und Quantität von Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern benötigt.

Auswirkungen kooperativer Funktionen auf die Verkehrsleistung einschätzen

Kollektive Perzeption erzeugt bei allen mit V2X-Technologie ausgestatteten Verkehrsteilnehmern eine gemeinsame Wissensbasis, wodurch geeignete Fahrerassistenzfunktionen zu signifikant verbessertem, kooperativem Fahrverhalten führen können. Hierdurch wird ein positiver Einfluss auf die Verkehrsleistung erwartet. Um dies gefahrlos und belastbar untersuchen zu können, war es das Ziel, basierend auf bereits verfügbaren Toolketten, für IMAGinE eine Simulationsumgebung adäquat zu erweitern. Für ausgewählte Fahrzeugfunktionen sollte analysiert werden, wie die Verkehrsleistung an beispielhaften Szenarien durch geeignete Wahl variabler Parameter

(etwa der Abstand zwischen den beteiligten Fahrzeugen oder die Häufigkeit der versendeten V2X-Nachrichten) verbessert werden kann.

Unterschiedliche Ansätze und Konzepte zur Manöverabstimmung entwickeln und die Machbarkeit der entsprechenden IMAGinE-Systeme demonstrieren

IMAGinE hatte sich zum Ziel gesetzt, ausgewählte, fahrerrelevante Funktionen und den durch sie erzielten Nutzen darzustellen, um die technische Machbarkeit des Vorhabens zu demonstrieren. Dies wurde einerseits in der Simulation, andererseits in der fahrerseitigen Forschungsimplementierung beispielhafter Funktionen umgesetzt. In IMAGinE wurden von den Partnern unterschiedliche Konzepte zur Manöverabstimmung verfolgt und deren Machbarkeit in Simulation und/oder im Versuchsträger demonstriert. Nach Möglichkeit wurden auch Mechanismen zur Interoperabilität entwickelt und dargestellt. Die Implementierungen in Pkw und/oder Lkw wurden umfangreichen Tests unterzogen. Für die Simulation des kooperativen Verhaltens mehrerer Fahrzeuge musste eine geeignete Simulationsumgebung aufgebaut werden.

Die Ergebnisse des Projektes demonstrieren

Zur Ergebnisverbreitung erfolgte eine Vernetzung mit nahestehenden Projekten, Plattformen und V2X-Organisationen. Insbesondere gab es einen engen Austausch mit den Förderprojekten PEGASUS und Ko-HAF. Zur Ergebnisverbreitung im Konsortium wurden gemeinsame Workshops abgehalten und der Ergebnistransfer an die C-ITS-Community geschah an der Abschlusspräsentation des Projekts.

Wie die Einzelziele von IMAGinE auf die im Kapitel Vision und Gesamtzielsetzung definierten Schwerpunktbereiche Technik, Interaktion und Verkehrsleistung einzahlen, ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Zuordnung der Einzelziele zu den Schwerpunkten

Einzelziele	Schwerpunktbereiche		
	Techno- logie	Inter- aktion	Verkehrsleistung und Sicherheit
Mechanismen der Kooperation analysieren und definieren	x	x	
Technische Systeme zu kooperativen Handlungen befähigen	x	x	
Kommunikationstechnologien für Abstimmung in Echtzeit nutzen	x		
Funktionsdesign für sichere Interaktion entwickeln	x	x	
Den Menschen im kooperativen Fahrzeug optimal unterstützen		x	x
Die Auswirkungen kooperativer Funktionen auf die Verkehrsleistung einschätzen			x
Die Machbarkeit der IMAGinE-Systeme demonstrieren	x		
Die Ergebnisse des Projektes kommunizieren	x	x	x

2.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“

IMAGinE wurde 2016 als Fördervorhaben im Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ (NFST) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, BMWi (seit 2021 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, BMWK) eingereicht und bewilligt. [3]

Kern dieses Programms ist die Suche nach innovativen Lösungsansätzen für Themen des automatisierten Fahrens. IMAGinE hatte sich zum Ziel gesetzt, mit seinen Arbeiten Beiträge zu mehreren Themenbereichen innerhalb der Programmsäule „Automatisiertes Fahren“ dieses Fachprogramms zu leisten.

Tabelle 2: Beiträge zum NFTS-Fachprogramm

Thema	Ziele des Fachprogramms	IMAGinE-Beiträge
Innovative Sensorik und Aktoriksysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung bestehender Sensorik- und Aktoriksysteme für Anforderungen höherer Automatisierungsgrade • Genauigkeit und Echtzeitfähigkeit • Robustheit und Ausfallsicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung der Umfeldwahrnehmung (einzelner Verkehrsteilnehmer durch den Austausch von Informationen über Objekte) • Schaffung der systemischen Voraussetzungen für kooperative Entscheidungen in Echtzeit • Schaffung eines Rahmensystems für kooperative Technologien und Umsetzung in Basiskomponenten • Erforschung und Entwicklung echtzeitfähiger Manöverfunktionen • Entwicklung und Untersuchung von Kooperationsverfahren, (die robustes und sicheres Verhalten von Verkehrsteilnehmern untereinander ermöglichen zum Ziel haben)
Hochgenaue Lokalisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Schaffen der Voraussetzungen für eine robuste, zuverlässige und genaue Eigenlokalisierung für die Abstimmung von Fahrmanövern sowie übergeordneten Lenkungsstrategien • Gewinnung und Aufbereitung von Informationen für die Lokalisierung und deren Abbildung (Georeferenzierung) in einer angepassten, digitalen und mehrstufigen Karte 	<ul style="list-style-type: none"> • Besondere Betrachtung der Entscheidungsfindung bei unvollständiger Informationslage einzelner Verkehrsteilnehmer und wie diese durch Kooperation und kooperative Manöverplanung ausgeglichen werden kann

Thema	Ziele des Fachprogramms	IMAGinE-Beiträge
Schnelle, sichere und zuverlässige Kooperation durch Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung bestehender kooperativer Fahrzeuglösungen unter Berücksichtigung aller informations- und kommunikationstechnischen Herausforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung eines Rahmensystems für kooperative Technologien • Umsetzung in Basistechnologien • Untersuchung und Erweiterung bestehender Kommunikationsprotokolle und Konzepte
Neuartige Verfahren zur Datenverarbeitung und -fusion	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung von Verfahren zur Sensordatenfusion und -auswertung • Einbindung und intelligente Verknüpfung der Informationen, die über kooperative Kommunikation zur Verfügung gestellt werden • Entwicklung einer Gesamtarchitektur 	<ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung des bisherigen Ansatzes zur Verarbeitung von Sensordaten und deren Fusion zu einem kongruenten Umfeldmodell durch Einbindung externer Objektdaten aus dem Verbund, die im Umfeldmodell fusioniert werden • Die Verarbeitung der Daten und die Berechnung von Verhalten soll kooperativ im Verbund gelöst werden
Mensch-Maschine-Interaktion	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchungen technologischer Fragestellungen, z.B. Erkennung und Interpretation des Fahrerzustandes und der Fahrer Verfügbarkeit sowie die neuartige Interaktion zwischen Mensch und Fahrzeug • Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzeranforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung zur Einbindung des Fahrers bei sich kooperativ verhaltenden und somit komplexeren Systemen
Angepasste Testverfahren und Validierung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung neuartiger Indikatoren, Testverfahren und -methoden für Tests und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen in Simulation • Gewährleistung der funktionalen Sicherheit bei automatischen Systemen • Validierung automatischer Fahrfunktionen inkl. technischer Machbarkeit und Beiträge zur Verbesserung 	<ul style="list-style-type: none"> • Demonstration und Validierung der entwickelten Systeme durch Fahrversuche und/oder Simulationen • Erprobung und Validierung innerhalb eines eigenen Teilprojekts • Neben der Umsetzung in der Simulation wird IMAGinE beispielhafte Funktionen umsetzen und in Realfahrzeugen erproben

Thema	Ziele des Fachprogramms	IMAGinE-Beiträge
	des Komforts, der Sicherheit und der Effizienz bzw. des Verkehrsflusses	

Die in IMAGinE geplanten Arbeiten waren zudem geeignet, um zur Erreichung mehrerer, durch die Bundesregierung formulierter Ziele beizutragen:

In der Hightech-Strategie der Bundesregierung ist innerhalb der Zukunftsaufgabe „Intelligente Mobilität“ das Schwerpunktthema „Intelligente und leistungsfähige Infrastruktur“ verortet, das den Fokus auf eine sichere, effizientere und umweltfreundlichere Gestaltung des Verkehrs legt, u.a. durch Forschungsprojekte zur Entwicklung von Lösungen zu Fahrerassistenzsystemen bis hin zu hochautomatisiertem Fahren. [4]

IMAGinE hatte sich die Erforschung, Entwicklung und Erprobung kooperativer Fahrmanöver zum Ziel gesetzt, die zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit beitragen können.

Im Aktionsplan zur Hightech-Strategie der Bundesregierung wurden innerhalb des beschriebenen Zukunftsprojekts „Nachhaltige Mobilität“ [5, p. 39f.]

eine Reihe von Zielen verfolgt, zu deren Erreichung IMAGinE bei folgenden Aspekten beitragen konnte: „Erhalt und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Bereich von Hochtechnologien“, „Verbesserung des Verkehrsflusses auf bestehenden Infrastrukturen“, „(Teil-)autonome und assistenzgestützte Fahrfunktionen unter Einbeziehung der Vernetzung von Fahrzeug und Infrastruktur“ und „Steigerung der Verkehrssicherheit zur Senkung der Zahl der Unfallopfer“.

Die Digitale Agenda 2014-2017 greift innerhalb des Themenbereichs „Digitale Infrastrukturen“ mit der Maßnahme „Mobilität fördern und neue Dienste unterstützen“ die Wichtigkeit der Straßenverkehrssicherheit und Straßenverkehrseffizienz auf und deren entscheidende Verbesserung durch intelligente Verkehrssysteme und automatisiertes Fahren auf. [6, p. 10]

IMAGinE hatte sich zum Ziel gesetzt, neuartige Systeme entlang den Prinzipien kooperativen Verhaltens zu erforschen. Damit wollte das Projekt den Weg für ein unfallfreies Fahren und eine Optimierung des Verkehrsflusses ebnen und Fahrer dabei unterstützen, sicherer, effizienter und entspannter ans Ziel zu kommen.

Mit der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie fordert die Bundesregierung unter anderem und insbesondere die Privatwirtschaft auf, durch Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme zur Verbesserung der Verkehrssicherheit für Fahrzeuginsassen und nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer beizutragen. [7, p. 197]

IMAGinE wirkte mit der Entwicklung kooperativer Systeme aktiv an der Erhöhung der Verkehrssicherheit mit: Sowohl mittelfristig als nächster Schritt nach Systemen basierend auf Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation als auch langfristig als Grundstein für die Kooperation automatisierter Fahrzeuge konnte IMAGinE die weitere Erhöhung der Verkehrssicherheit vorantreiben.

Das IMAGinE-Konsortium

IMAGinE verfolgte mit der Entwicklung einer Referenz zur kooperativen Manöverplanung ein Ziel, das Forschungsarbeiten an vielfältigen Teilaspekten erfordert. Um diesem Vorhaben gerecht zu werden, vereinte IMAGinE ein Konsortium der relevanten Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Deutschland. Es umfasste führende Automobilhersteller, Zulieferer, KMU, Wissenschaftspartner und eine Institution der öffentlichen Hand und damit alle relevanten Gruppen, um das Projekt breit aufzustellen, was zur Erzielung einer breiten Akzeptanz der Lösungen essenziell war. IMAGinE umfasste somit die gesamte Technologieverwertungskette. Zusätzlich wurde großer Wert auf die Ausgewogenheit des Konsortiums, insbesondere auf die Einbeziehung von KMU, gelegt. Nachfolgende Abbildung stellt die Partnerstruktur dar.

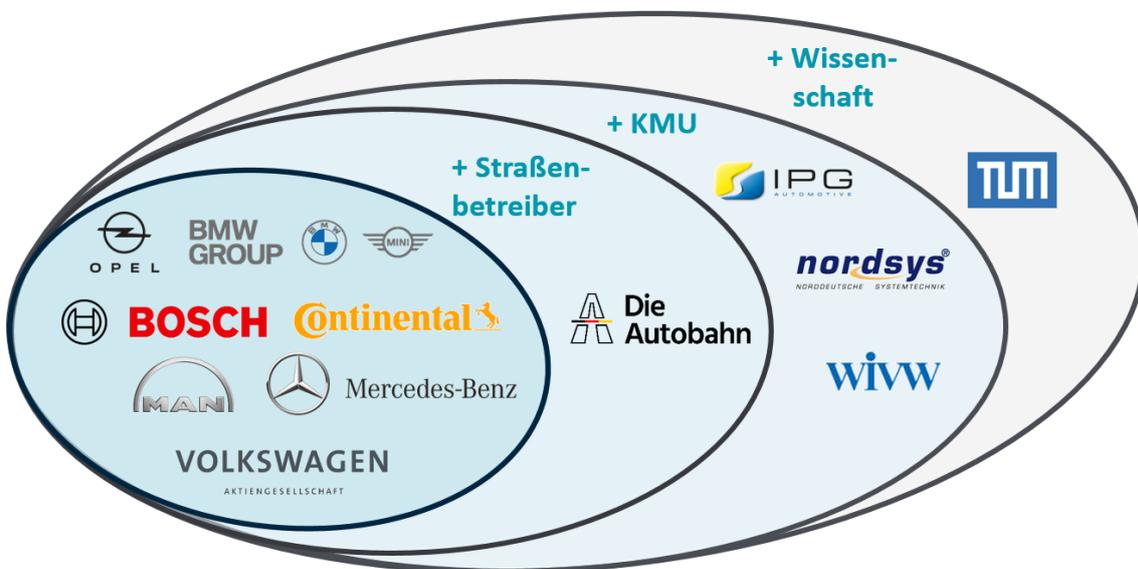


Abbildung 1: Partnerstruktur in IMAGinE

Jeder dieser Partner brachte spezielles Know-how in das Projekt ein und trug zur Kompetenzbündelung bei. Mit der Opel Automobile GmbH, BMW AG, Mercedes-Benz AG, MAN Truck & Bus SE und Volkswagen AG waren die wichtigsten Player der deutschen Automobilindustrie vertreten. Sie brachten ihr Wissen aus den Bereichen Automation und Kommunikation sowie Assistenzsysteme und Fahrfunktionen in das Projekt ein. Erfahrungen aus vorangegangenen Forschungsprojekten unterstrichen dies.

Mit der Continental AG und der Robert Bosch GmbH waren zwei führende deutsche Hersteller und Zulieferer für die Automobilindustrie in IMAGinE vertreten. Sie ergänzten ideal die Arbeiten der Automobilhersteller in den Bereichen der Architektur und der Funktionsentwicklung. Sowohl Continental als auch Bosch brachten langjährige Erfahrungen in der Zusammenarbeit in großen Forschungsprojekten – sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene – in IMAGinE ein.

Die KMU Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) GmbH, IPG Automotive GmbH und Nordsys GmbH nahmen als Partner in IMAGinE teil. Die WIVW GmbH hat sich als

Forschungsdienstleister auf dem Gebiet der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) im Bereich Fahrerassistenz und Automation etabliert. Darüber hinaus entwickelt und vertreibt die WIVW GmbH Fahrsimulationssoftware, die die systematische Darstellung und Untersuchung interaktiven bzw. kooperativen Verhaltens unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Diese Software kam bei mehreren Konsortialpartnern zum Einsatz. Die IPG Automotive GmbH hat als etablierter Anbieter von Simulationslösungen einen wesentlichen Beitrag zu den Simulationsarbeiten in IMAGinE geleistet. Die Nordsys GmbH ist im Bereich der V2X-Kommunikation anerkannt und konnte ihre Expertise für die Arbeiten zur Schaffung der systemischen Voraussetzungen für kooperative Entscheidungen in Echtzeit in IMAGinE einbringen.

Mit der Technischen Universität München nahm ein Wissenschaftspartner an IMAGinE teil, der im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) und Fahrzeugtechnik anerkannt ist.

Als eine Institution der öffentlichen Hand war Die Autobahn GmbH des Bundes am Projekt IMAGinE beteiligt. Als Straßenverkehrsbehörde brachte sie Expertise in den Bereichen Verkehrsfluss und Verkehrsmanagement in das Projekt ein.

2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

2.3.1 Projektstruktur

IMAGinE wurde entlang der aufeinanderfolgenden Aktivitäten im Projekt strukturiert. Der nachfolgender Projektstrukturplan zeigt die Teilprojekte (TP) und ihre einzelnen Arbeitspakete (AP) auf.



Abbildung 2: Projektstrukturplan

Die Aufgaben verteilten sich auf fünf inhaltliche und ein querschnittliches TP.

TP1: Analyse von Kooperationsszenarien

TP1 befasste sich mit der Analyse der Kooperationsszenarien aus Fahrersicht. TP1 kategorisierte, beschrieb und analysierte die kooperativen Funktionen und IMAGinE-Use Cases mit dem Ziel, harmonisierte Anforderungen herzuleiten. Die Anforderungen an MMI und kooperative Manöver wurden aus Fahrersicht beschrieben und den nachfolgenden TPs bereitgestellt.

TP2: Kooperative Funktionen und Systemarchitektur

Zielsetzung von TP2 war es, basierend auf den von TP1 gelieferten Anforderungen aus Fahrersicht eine technische Spezifikation der Systemarchitektur zu entwickeln. Dazu wurden partnerübergreifende Rahmenspezifikationen für kooperative Funktionen erarbeitet. Die Spezifikation von Schnittstellen und die Erstellung einer ersten prototypischen Umsetzung mit Verifikation in der Simulation sollte die Interoperabilität der IMAGinE-Funktionen innerhalb eines betrachteten Konzepts zur Manöverabstimmung gewährleisten und diente als gemeinsame Basis der weiteren IMAGinE-Entwicklungsarbeiten. Parallel dazu wurden relevante MMI-Grundlagen für kooperative Systeme erarbeitet.

TP3: Kooperative Technologien

Basierend auf den Anforderungen aus TP1 und passend zur Systemarchitektur und den technischen Spezifikationen aus TP2, nahm TP3 die Umsetzung notwendiger Softwaremodule vor. Dies umfasste sowohl die Algorithmen, die im Fahrzeug Anwendung fanden, als auch Entwicklungs- und Evaluierungswerkzeuge. Die grundlegenden Module und Protokolle zur hybriden Kommunikation und kollektiven Perzeption wurden umgesetzt. Die kooperative Manöverplanung wurde entwickelt und getestet, die notwendigen Simulationswerkzeuge und Modelle aufgebaut.

TP4: System- und Fahrintegration

In TP4 erfolgte die Integration des IMAGinE-Systems in die Versuchsfahrzeuge beziehungsweise in Simulation. Dies umfasste die Ausrüstung der Fahrzeuge und Laboraufbauten, den Aufbau und die Integration der gemeinsam definierten Komponenten, wie Positionierungseinheit, Kommunikationseinheit und IMAGinE-Rechner. In weiteren Schritten wurden die kooperativen Funktionen in die Fahrzeuge und Simulatoren eingebunden und getestet.

TP5: Evaluierung und Erprobung

In TP5 wurde die Funktionalität der entwickelten Technologien untersucht und Optimierungsbedarfe für die Weiterentwicklung der Systeme abgeleitet. Die Wirkung der Technologien im Hinblick auf Sicherheits- und Effizienzverbesserungen sowie den Komfort für den Fahrer wurde dabei betrachtet. Außerdem wurde in TP5 die gemeinsame Demonstration der Technologien und Funktionen umgesetzt.

TP6: Projektmanagement

TP6 nahm in IMAGinE die querschnittlichen Aufgaben des Projektmanagements wahr. Das Gesamtziel von TP6 war es, die Erreichung der Projektziele und die angestrebte Qualität der Projektergebnisse sicherzustellen. In TP6 wurden geeignete Maßnahmen des technischen und operativen Projektmanagements entwickelt und umgesetzt. Neben der technischen Koordination und der Projektadministration war die Ergebnisverbreitung eine Kernaufgabe von TP6. Damit stellte TP6 die Projektkommunikation nach innen und außen, d.h. mit dem Konsortium, allen Beteiligten und der Öffentlichkeit sicher.

2.3.2 Projektzeitplan

IMAGinE wurde am 01.09.2016 gestartet und endete am 31.05.2022. Ursprünglich war das Projektende für August 2020 vorgesehen. Im Zuge der Arbeiten zur Ausschreibung eines gemeinsamen Unterauftrags zur Manöverabstimmung stellte sich heraus, dass das Projekt nicht wie geplant durchgeführt werden konnte. Nach aufwendigen Abstimmungen wurde eine neue Vorhabenbeschreibung erstellt, die u.a. eine Projektverlängerung bis Mai 2022 enthielt. Der Partner MAN begleitete den Verlängerungszeitraum nicht mehr aktiv. Die übergeordnete Projektstruktur war davon nicht betroffen.



Abbildung 3: Projektzeitplan

2.3.3 Kooperative Fahrfunktionen

IMAGinE hatte sich zum Ziel gesetzt, ausgewählte, fahrerrelevante Funktionen und den durch sie erzielten Nutzen darzustellen, um die technische Machbarkeit des Vorhabens zu demonstrieren. Dies erfolgte einerseits in der Simulation, andererseits wurden die Funktionen fahrzeugseitig umgesetzt. Die sechs ausgewählten Funktionen sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

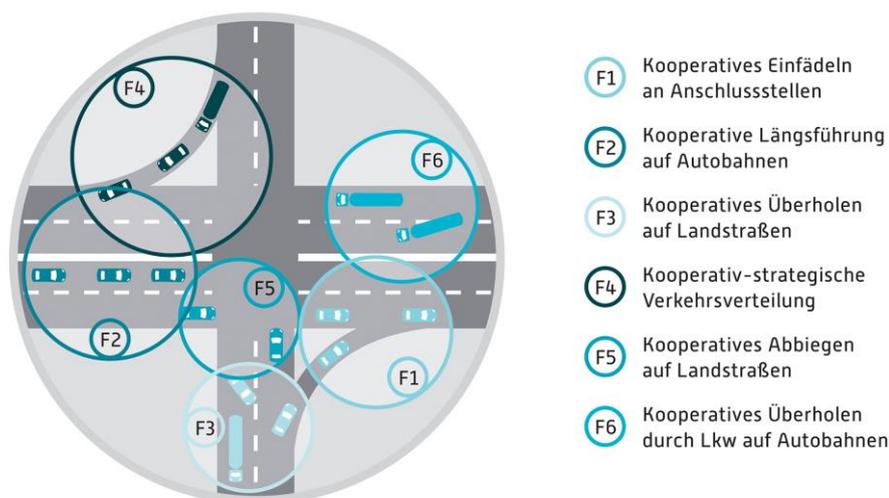


Abbildung 4: Die IMAGinE-Funktionen im Überblick

2.3.4 Meilensteine und Deliverables

Im Verbundvorhaben IMAGinE wurden fünf Projektmeilensteine definiert, anhand derer sich Projektfortschritt und -erfolg – sowohl nach innen (innerhalb des Konsortiums) als auch nach außen (gegenüber dem Fördergeber und der Fachöffentlichkeit) – erfassen und kommunizieren ließen.

Der erste Projektmeilenstein (MS1) lag im Projektmonat 10 und umfasste die Rahmenspezifikation des IMAGinE-Systems und der Funktionen. Auf dieser Grundlage wurde die IMAGinE-Systemarchitektur festgelegt. MS1 wurde mit Abschluss von AP2.1 und der Ergebnisdokumentation in Deliverable D2.1 erreicht.

Der zweite Projektmeilenstein (MS2) lag im Projektmonat 52 und wurde mit dem Abschluss der Implementierung der Manöverplanung erreicht. Damit lagen zu MS2 alle Hauptkomponenten vor.

Der dritte Projektmeilenstein (MS3) wurde mit dem Abschluss der Fahrzeugintegration im Projektmonat 61 erreicht: Die Hauptkomponenten sind in die Versuchsfahrzeuge der Partner erfolgreich integriert und die kooperativen Funktionen damit implementiert worden.

Der vierte Projektmeilenstein (MS4) wurde zum Ende der Projektlaufzeit im Projektmonat 69 erreicht: Evaluation und Demonstration der in IMAGinE entwickelten Funktionalitäten wurden abgeschlossen. Zeitgleich zum MS4 fand die Abschlusspräsentation des Projekts statt.

Der fünfte Meilenstein (MS5) lag im Projektmonat 36. Zu MS5 hatten die Projektpartner die Vorhabenbeschreibung überarbeitet: Das Projektkonzept – und damit einhergehend die Zeit- und Arbeitsplanung – wurde entsprechend überarbeitet.

Die Projektmeilensteine sind in nachfolgender Abbildung zusammenfassend dargestellt.



Abbildung 5: Übersicht der Projektmeilensteine

Die Dokumentation der in den Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten, der erzielten Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnissen erfolgt in Deliverables. Für jedes AP wurde ein Deliverable definiert. Eine Übersicht der veröffentlichten Deliverables befindet sich in Anhang 2.

2.3.5 Gemeinsame Unteraufträge

Durch das Konsortium wurden neun Aufgaben identifiziert, deren Umsetzung für den Erfolg des Vorhabens IMAGinE aus technologischer bzw. organisatorischer Perspektive notwendig sind, die jedoch nicht durch einzelne Partner erbracht werden können. Aufgrund der Spezifität dieser Aufgaben war geplant, sie als gemeinsame Unteraufträge (GUA) durch alle Partner ausführen zu lassen. Eine Übersicht der GUA findet sich nachfolgender Tabelle.

Tabelle 3: Übersicht der gemeinsamen Unteraufträge

ID	GUA-Bezeichnung	Verantwortlicher Partner	Anmerkung
GUA1	Erstellung und Verifikation von Software zur kooperativen Durchführung von Fahrmanövern	BMW	
GUA2	Erstellung und Verifikation von Software zur Haltung und Verarbeitung von Fahrzeugdaten aus verschiedenen Quellen in einem Umfeldmodell	VW	
GUA3	Framework Support	VW	im Projektverlauf entfallen
GUA4	Untersuchung des Kommunikationskanals beim Austausch von Manöver-Koordinierungsnachrichten	OPEL	
GUA5	Entwicklung eines LTE-basierten infrastrukturlosen Proximity Service	OPEL	im Projektverlauf entfallen
GUA6	Anmietung und Einrichtung Testgelände	Die Autobahn	
GUA7	Kartierung Testgelände	Die Autobahn	im Projektverlauf entfallen
GUA8	Projektbüro für Projektmanagement	OPEL	
GUA9	Projektbüro für Ergebnisverbreitung	OPEL	

2.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangslage

Die Automation von Fahrzeugen wird seit Jahrzehnten mit kontinuierlich steigender Intensität erforscht und hält nach und nach Einzug in den Alltag. Im täglichen Verkehr entstehen dennoch Situationen, in denen ein automatisiertes System nicht optimal reagieren kann. In solchen Situationen sind automatisierte Systeme auf das kooperative Verhalten und auf Informationen anderer Verkehrsteilnehmer angewiesen.

Um das Potenzial der Kooperation nutzen zu können, müssen Funktionserweiterungen im Bereich der Kommunikation (V2X) und der kollektiven Umfeldwahrnehmung vorgenommen werden. Zusätzlich muss eine Möglichkeit zur Gestaltung kooperativer V2X-Absprachen zwischen den Fahrzeugen geschaffen werden.

Eine Reihe von Forschungsprojekten hat sich bereits mit dem Thema Automatisierung und Kooperation in und zwischen Fahrzeugen beschäftigt (z.B. AKTIV, Ko-FAS, Ko-PER, Ko-HAF, simTD). IMAGinE zielt hierbei, als Weiterentwicklung zu anderen Vorhaben, auf eine direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen zur Abstimmung von Manövern ab. Ein weiterer Schwerpunkt ist

die Betrachtung der Mensch-Maschine-Interaktion. Der Fahrer soll in den relevanten Szenarien über die Absichten und Handlungen des kooperativen automatisierten Systems informiert werden.

Ein Merkmal der Kooperation ist die Bereitschaft eines Verkehrsteilnehmers, kurzzeitige oder vorübergehende Nachteile in Kauf zu nehmen (z.B. Reduktion der Geschwindigkeit), um damit jedoch in Summe einen Vorteil für alle an der Situation beteiligten Verkehrsteilnehmer zu generieren. Dieser kollektive Vorteil muss dem Fahrer in geeigneter Weise kommuniziert werden, um die Akzeptanz für das kooperative „Handeln“ des Systems zu erreichen.

IMAGinE adressiert hierbei insbesondere den Mischverkehr, der sich durch das Vorhandensein von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden auszeichnet. Dies ist wichtig und notwendig, weil hoch- oder vollautomatisierte Fahrzeuge noch lange Zeit parallel zu herkömmlichen nicht- oder niedrig automatisierten Fahrzeugen unterwegs sein werden.

Im Projekt Ko-FAS bzw. Ko-Per wurde insbesondere die „Kooperative Perzeption“ untersucht, die hier als Erweiterung der Kommunikation eingestuft wird, da zum Beispiel das Umfeldmodell sowohl durch infrastrukturegebundene Sensoren als auch von Sensordaten aus den beweglichen Fahrzeugen gebildet wird. In IMAGinE steht darüber hinaus die zielgerichtete Interaktion zwischen den Fahrzeugen im Mittelpunkt. Das heißt, es wird eine direkte Verhaltensbeeinflussung angestrebt und die Kommunikation nicht mehr nur als Sensor verstanden. Eine weitere Herausforderung ist es, den Fahrer so in diese Interaktion zu integrieren, dass das Verkehrssystem insgesamt an Sicherheit und Effizienz gewinnt.

Forschungsprojekte wie Adaptive gingen davon aus, dass komplexe Szenarien mit Hilfe der V2X-Kommunikation sicherer und komfortabler gelöst werden können, enthielten aber im Gegensatz zu IMAGinE keine V2X-Manöver-Absprachen zwischen den Kooperationspartnern.

Im Projekt Ko-HAF wurde zur Realisierung hochautomatisierter Fahrfunktionen ein Safety Server genutzt, über den die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen abgewickelt wurde. IMAGinE nutzt dagegen die direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen zur Abstimmung zwischen den Systemen und zwischen Mensch und Fahrzeug.

2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

2.5.1 European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

2.5.1.1 Collective Perception Service

In IMAGinE wurde der Collective Perception Service (CPS) nach einer Vorabdefinition nach ETSI umgesetzt und in einem Gesamtverbund aus bis zu 10 Fahrzeugen umgesetzt. Dies umfasst neben dem Versand der Collective Perception Message (CPM) auch die Generierung der Nachrichten für den Versand und die Verwendung der empfangenen Nachrichten mit Hilfe von kooperativer Objektfusion. IMAGinE hat die Leitung (Rapporteur-Rolle) im CPS Work Item übernommen

(Volkswagen 2016-2021, Bosch 2021-2022) und maßgebliche Beiträge zur Standardisierung geliefert (u.a. Regeln für die Message-Segmentierung, Nutzung von East-North-Up Objektkoordinaten, Generierungsregeln für nicht-motorisierte Vulnerable Road Users).

Einige Partner in IMAGinE konnten so in Ihrer Arbeit in ETSI die Standardisierung durch Ergebnisse aus IMAGinE realistischer gestalten. Es sei allerdings gesagt, dass IMAGinE nicht das einzige Projekt in Europa ist, das die CPM verwendet. Andere Projekte sind u.a.

- 5GNetMobil
- Lukas, gefördert durch das BMWK
- TransAID
- @CITY

Die Verwendung der CPM in diesen Projekten ist jedoch vielfältig. Ein weiteres Projekt mit der Kombination aus Direktkommunikation zwischen Fahrzeugen ist nicht bekannt. Andere Projekte nutzen die CPM für den Versand von Objektinformationen aus der Infrastruktur an Fahrzeuge oder auch über ein 5G-basiertes Kommunikationsmedium in die Cloud.

2.5.1.2 Maneuver Coordination Service (MCS)

Die Arbeitsgruppe zum Maneuver Coordination Service wurde in der Anfangsphase von IMAGinE ins Leben gerufen. Die Rapporteur-Rolle wurde auch von einem IMAGinE-Vertreter (Volkswagen) übernommen. Die Arbeiten aus IMAGinE wurden bereits in der Anfangsphase dort eingebracht, mussten dann aber mit den Interessen der Infrastrukturbetreiber in Einklang gebracht werden. Da diese Verfahren aber in ihren Anforderungen sehr gegensätzlich sind und die Notwendigkeit, eine schnelle Einigung zu finden, nicht gegeben war, ist die Arbeitsgruppe zunächst inaktiv gewesen. Die Arbeiten wurden Anfang 2022 mit einem neuen Rapporteur wieder aufgenommen. Gleichzeitig wurden Ergebnisse aus dem nationalen französischen Projekt „Perception Augmented via Cooperation V2X“ (PAC-V2X) und dem EU-Projekt „TransAID“ zusammen mit den Ergebnissen aus IMAGinE eingebracht. Da der Manöverabstimmungsansatz aus IMAGinE sich teilweise erheblich von den anderen Ansätzen unterscheidet, bzw. das TransAID-Projekt eine Unterscheidung zwischen infrastrukturbasierter und fahrzeugbasierter Manöverabstimmung vorgenommen hat, werden Anstrengungen unternommen, diese beiden Konzepte so effizient wie möglich zu einem gemeinsamen Konzept zu verweben.

2.5.2 Car to Car Communication Consortium

Das [CAR 2 CAR Communication Consortium](#) (C2C-CC) ist ein gemeinnütziger Zusammenschluss Europäischer Fahrzeughersteller, unterstützt von Zulieferern, Forschungseinrichtungen und weiteren Partnern mit dem Ziel, die Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr durch den Einsatz kooperativer intelligenter Verkehrssysteme (ITS) mittels Fahrzeug-zu-Fahrzeug (V2V)- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur (V2I)-Kommunikation zu steigern. IMAGinE hat sich insbesondere in der Working Group „Functional“ des C2C-CC mit Beiträgen bei folgenden Work Items eingesetzt:

- Guidance for Day 2-3-4: Beiträge zum White Paper "[Guidance for day 2 and beyond roadmap](#)" zu Cooperative Merging
- C2C-CC Position on Cooperative Connected Automated Driving: Beiträge zum White Paper mit IMAGinE-Projektbeschreibung
- C2C-CC Contribution to ETSI Basic Set of Applications, Release 2: Beiträge zu Uses Cases mit Bezug zu Collective Perception

3 EINGEHENDE DARSTELLUNG

3.1 TP1: Analyse von Kooperationsszenarien

3.1.1 Zielsetzung

TP1 hatte zum Ziel, die in der Vorhabenbeschreibung festgelegten Use Cases zu analysieren und harmonisierte Anforderungen herzuleiten. Dabei sollten insbesondere die verschiedenen Fahrerarten, Fahrstrategien und Fahrtzwecke mit einbezogen werden. Die wichtigsten Ziele von TP1 wurden wie folgt definiert:

- Einordnung von kooperativen Funktionen
- Beschreibung der Use Cases
- Analyse der Use Cases
- Erarbeitung der Anforderungen an kooperative Funktionen aus Fahrersicht
- Harmonisierung und Priorisierung über alle Use Cases hinweg
- Erarbeitung erster Prinzipien zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion

Um diese Ziele zu erreichen, wurden die Aktivitäten im TP1 folgendermaßen strukturiert:

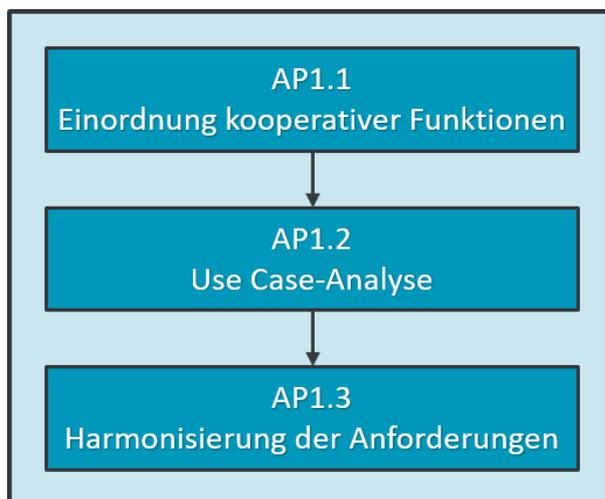


Abbildung 6: Arbeitsstruktur des TP1

Mit AP1.1 Einordnung kooperativer Funktionen sollte ein gemeinsames Verständnis von Kooperation unter motorisierten Verkehrsteilnehmern geschaffen werden. Dafür wurde unter anderem eine Literaturanalyse durchgeführt, um verschiedene Kategorien von Kooperation zu definieren. Im folgenden AP1.2 Use Case-Analyse wurden für die IMAGinE-Funktionen verschiedene Use Cases ausgearbeitet und analysiert. Zusätzlich wurden die Use Cases prototypisch in einer Fahrsimulation umgesetzt. In AP1.3 Harmonisierung der Anforderungen wurden die Anforde-

rungen von allen Use Cases betrachtet, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu identifizieren. So sollten im weiteren Projektverkauf Synergien zwischen den Funktionen effizienter genutzt werden.

3.1.2 AP1.1: Einordnung kooperativer Funktionen

Zentrale Aufgabe des AP1.1 war es, für grundlegende Fragen ein gemeinsames Verständnis zu schaffen. Dafür wurden bspw. umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt, um Fragen wie „Was ist Kooperation?“ und „Wie kann kooperatives Verhalten motiviert werden?“ zu beantworten. Aus dieser weiten Übersicht, wie Kooperation in der aktuellen Forschungslandschaft definiert wurde, wurde dann ein konkretes Kooperationsverständnis für IMAGinE abgeleitet. Für eine einfache Beschreibung wurden sechs IMAGinE-Kooperationsfähigkeitsstufen (IKS) definiert, die das Kernergebnis des AP1.1 darstellen.

Stufe	Kooperatives Fahren	Technische Kommunikation V2X	Erläuterung zu Kooperation	Erläuterung zu Kommunikation
0	nein	-		ausgeschalteter CAM/DEM/... Versand, wenn Fahrzeug ausgerüstet
1	ja	nein		
2	Ja	ja (unidirektional)	andere Fahrzeuge werden über den Zustand des kommunizierenden Fahrzeugs versorgt	Kommunikation auf Basis von CAM/DENM
3	ja	ja (unidirektional)	andere Fahrzeuge werden mit zusätzlichen Umfeldinformationen versorgt	Kommunikation zusätzlich auf Basis von CPM
4	ja	ja (bidirektional)	Einzelentscheidungsfindung (ein Fahrzeug (Master) schlägt Verhalten vor („zentrale Planung“)), andere Fahrzeuge akzeptieren oder lehnen dies ab	ein Vorschlag, daraus resultierend ja/nein-Antwort
5	ja (bilateral)	ja (bidirektional)	gemeinsame Entscheidungsfindung („dezentrale Planung“) und gemeinsames Manöver	Antwort mit Alternativen zum Vorschlag

Abbildung 7: Übersicht der IMAGinE-Kooperationsfähigkeitsstufen

Die Ergebnisse von AP1.1 wurden 2017 im Rahmen des D1.1 dokumentiert.

3.1.3 AP1.2: Use Case-Analyse

AP1.2 hatte sich zum Ziel gesetzt, für jede Funktion (1) die Use Cases zu beschreiben, (2) die Use Cases zu analysieren, (3) die Use Cases in der Fahrsimulation prototypisch darzustellen, (4) eine

Vorevaluation von Akzeptanzgrenzen durchzuführen, und (5) Anforderungen aus Fahrersicht an Manöver und MMI zu erarbeiten.

Use Case-Beschreibung

Die Beschreibung und Analyse der Use Cases wurde durch sechs Funktionsteams geleistet (**Funktionsleiter**):

1. F1 - Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen: Opel, BMW, Continental, Mercedes, Die Autobahn, MAN, **Bosch**, TUM, VW, WIVW
2. F2 - Kooperative Längsführung auf Autobahnen: Opel, Continental, **Mercedes**, Die Autobahn, MAN, Bosch, TUM, VW, WIVW
3. F3 - Kooperatives Überholen auf Landstraßen: Continental, MAN, Bosch, TUM, **VW**, WIVW
4. F4 - Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung: Opel, **Die Autobahn**, VW
5. F5 - Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen: Opel, **Continental**, Bosch, VW, WIVW
6. F6 - Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen: Die Autobahn, **MAN**, TUM, VW

Die Beschreibung der verschiedenen Use Cases durch die Funktionsteams stellte den Status quo und aktuelle Probleme der Fahrer mit Hilfe einer Visualisierung der Situation dar. Es wurde die Frage geklärt, in welchen Situationen und bei welchen Aufgaben die Funktion den Fahrer unterstützt und warum diese Unterstützung nötig ist. Weiterhin wurde über Funktionsbäume eine Einordnung der Use Cases und Szenarien vorgenommen. Dabei wurde auch Bezug auf die definierten IMAGinE-Kooperationsstufen genommen.

Die Use Cases wurden von den Funktionsteams priorisiert und jedes Funktionsentwicklungsteam hat sich auf einen zu bearbeitenden Use Case festgelegt, der im Rahmen von IMAGinE im Fahrzeug umgesetzt werden sollte (vgl. Abbildung 8 beispielhaft für Funktion 1).

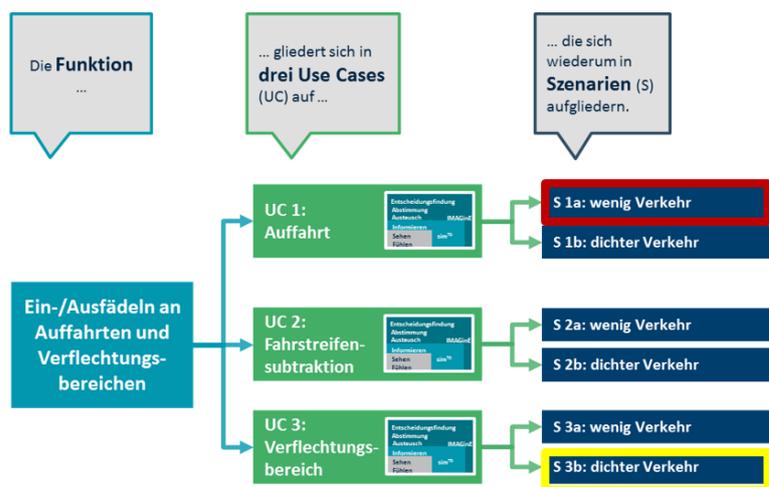


Abbildung 8: Funktionsbaum für Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen (rot: Priorität 1 Nutzenfall, gelb: Priorität 2 Nutzenfall).

Use Case-Analyse

Die Use Case-Analyse startete für jede Funktion mit einer graphischen Darstellung (Big Picture) der verschiedenen Manöverphasen und der am Manöver beteiligten Akteure sowie deren Rollen (vgl. Abbildung 9 beispielhaft für Funktion 1)).

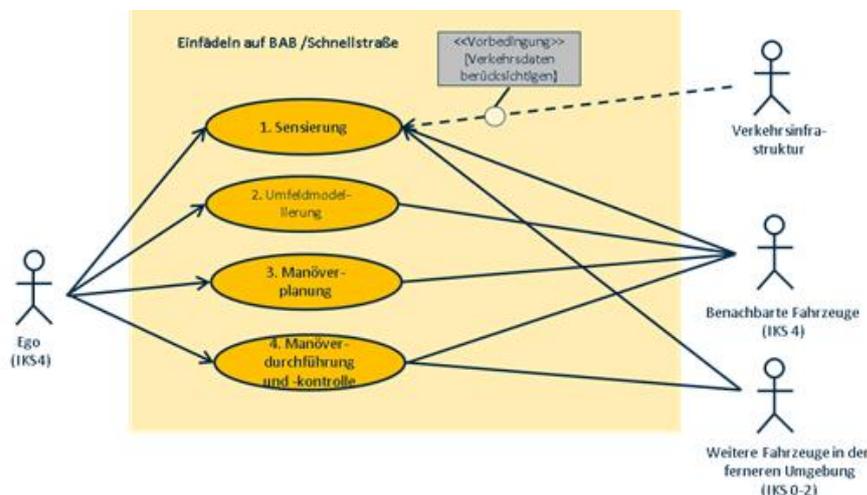


Abbildung 9: „Big Picture“ der Funktion F1 „Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen“.

Anschließend wurde eine tabellarische Darstellung des Ablaufs aus Fahrersicht für jede Manöverphase (störungsfreier Ablauf „Basic Flow“ / störungsbehafteter Ablauf „Alternativer Flow“) spezifiziert und über die Funktionen hinweg vereinheitlicht. So entstand für jede der Phasen eine Übersicht, in der die Fragen Wer?, Wann?, Was?, Wie?, Wie lange? und Wo? beantwortet und die Abbruchvarianten benannt wurden. Zudem erfolgte die Erstellung von Fahrerinteraktionsdiagrammen – ebenfalls für jede der Phasen des Manövers. Die Abbildung 10 zeigt ein Beispiel aus Funktion 2.

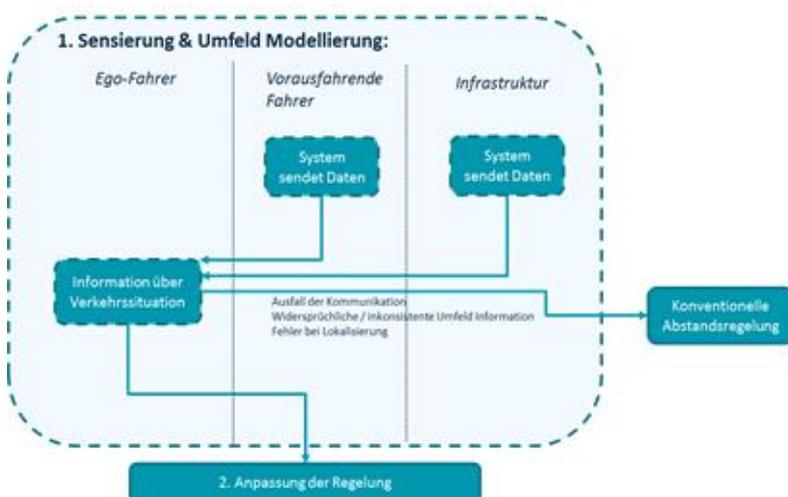


Abbildung 10: Interaktionsdiagramme für die Phase Sensierung & Umfeldmodellierung aus Funktion F2 (Fahrersicht).

Weiterhin wurde der Ablauf der einzelnen Phasen für alle Funktionen aus Fahrzeugsicht tabellarisch dargestellt. Hierbei lag der Fokus auf einer ersten Darstellung der nacheinander ablaufenden Schritte in jeder Manöverphase inklusive erster technischer Angaben bezüglich der Art von Daten, die in der Fahrzeugkommunikation ausgetauscht werden sollten.

Prototypische Darstellung in Fahrsimulation

Zur Visualisierung der Use Cases und zur Unterstützung der Use Case-Analyse wurden prototypische Szenarien für die verschiedenen Funktionen in dem Fahrsimulator SILAB umgesetzt. Im Rahmen von Präsenzmeetings konnten die Teilnehmer die Szenarien in einem Fahrsimulator auch durchfahren und erleben. Weiterhin wurden mit Hilfe des Fahrsimulators Videos erstellt, die die Use Case-Analyse und die Definition der Funktionsziele unterstützt haben.



Abbildung 11: Visualisierung in SILAB (hier am Beispiel der Funktion 6: „Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen“).

Vorevaluation Akzeptanzgrenzen

Um die Frage zu beantworten, welche Akzeptanzgrenzen hinsichtlich der Nutzung von kooperativer Fahrerassistenz existieren, wurden von der TUM in einer umfassenden Literaturrecherche unterschiedliche Akzeptanzmodelle miteinander verglichen. Anschließend wurde eine Studie zu Akzeptanzgrenzen von kooperativer Assistenz durchgeführt.

Anforderungen aus Fahrersicht, Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen

Eine detaillierte Literaturanalyse zu den verschiedenen Use Cases stellte die Anforderungen aus Fahrersicht dar, die während der verschiedenen Manöverphasen relevant sind. Die Literaturanalyse gliederte sich für die meisten Funktionen in die Abschnitte (1) allgemeine Befunde, (2) zeitliche Parameter der Fahrzeuginteraktion und (3) Untersuchungen zu bestehenden Informations- bzw. Assistenzlösungen. Am Ende eines jeden Kapitels wurden zudem sogenannte weitere funktionspezifische Untersuchungsgegenstände benannt. Dabei handelt es sich um Fragestellungen, die im Rahmen der Use Case-Analyse durch die Projektpartner identifiziert wurden, die

aber über die Perspektive, die TP1 einnimmt, hinausgehen. Diese Fragestellungen wurden dennoch benannt und beschrieben, da sie für die weitere inhaltliche Ausplanung der folgenden Teilprojekte TP2, TP3, TP4 bzw. TP5 relevant sein könnten.

Die Resultate der Literaturanalyse wurden zusammengefasst und diskutiert. Dabei wurden auch Empfehlungen zur MMI-Gestaltung abgeleitet.

Die Ergebnisse des AP1.2 wurden im Deliverable D1.2 „Use Case-Analyse“ umfassend (Umfang: 267 Seiten) dargestellt. Damit wurden die Ziele des Arbeitspakets vollumfänglich erreicht.

3.1.4 AP1.3: Harmonisierung der Anforderungen

Das Ziel dieses Arbeitspakets war es, eine Zusammenfassung und Harmonisierung der Anforderungen zu erstellen. Dabei sollten die Anforderungen aus den Use Cases verschiedener Funktionen verglichen und dabei Gemeinsamkeiten identifiziert und zusammengeführt werden. Zur Umsetzung dessen erfolgte die Abstimmung zwischen den verschiedenen Funktionsverantwortlichen, MMI-Experten und den Autoren des Deliverables in diversen Telefonkonferenzen.

Das Ergebnis des Arbeitspakets ist Deliverable D1.3, das in den ersten drei Kapiteln die Harmonisierung der Anforderungen in folgender Form behandelt:

- Aufbau
- MMI-Harmonisierung
- Nachrichteninhalte

Aufbau

Im Kapitel „Aufbau“ wurden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Funktionen aus Fahrzeugsicht erarbeitet, wobei auf jede Phase (Sensierung, Umfeldmodellierung, Manöverplanung und Manöverdurchführung/-kontrolle) einzeln eingegangen wurde. In tabellarischer und textueller Form wurden relevante Informationen aus allen Funktionen zusammengetragen, die in der jeweiligen Phase von Bedeutung sind oder sein könnten, und für die weitere Definition bzw. Spezifikation in den nachfolgenden TPs als Grundlage herangezogen wurden. So wurden z.B. in der Phase Sensierung für alle Funktionen herausgearbeitet, welche Daten die Onboard-Sensorik verwendet, ob Infrastrukturdaten herangezogen werden und welche Umgebungsdaten empfangen werden sollen (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Sensierungsbereich der einzelnen Funktionen

Funktion	Onboard-Sensorik	Infrastruktur	CAM / DENM / erweiterte Umgebungsdaten
F1	Eigene Sensordaten abrufen	Streckeninfo und Verkehrsinformation abrufen / empfangen	Fahrzeuginformationen von situationsrelevanten Fahrzeugen empfangen (CAM, DENM, erweiterte Umgebungsdaten)
F2	Eigene Sensordaten abrufen	Streckeninfo und Verkehrsinformation abrufen / empfangen	Fahrzeuginformationen von situationsrelevanten Fahrzeugen empfangen (CAM, DENM, erweiterte Umgebungsdaten)
F3	Eigene Sensordaten abrufen, Annäherung an Lkw sensieren		Fahrzeuginformationen von situationsrelevanten Fahrzeugen empfangen (CAM, DENM, erweiterte Umgebungsdaten)
F4	Routenkriterien wählen (systembedingt voreingestellt oder vom Fahrer eingegeben), Fahrzeugdaten an Strategischen Support	Streckeninfo und Verkehrsinformation abrufen / empfangen	Fahrzeugverteilung aus CAMs
F5	Eigene Sensordaten abrufen, Abbiegewunsch erkennen		Fahrzeuginformationen von situationsrelevanten Fahrzeugen empfangen (CAM, DENM, erweiterte Umgebungsdaten)
F6	Eigene Sensordaten abrufen	Streckeninfo und Verkehrsinformation abrufen / empfangen	Fahrzeuginformationen von situationsrelevanten Fahrzeugen empfangen (CAM, DENM, erweiterte Umgebungsdaten)

Vor der Zusammenführung der Daten in dieser Tabelle, wurde – wie auch in den anderen Phasen – eine Vereinheitlichung der Begriffe vorgenommen. Somit ermöglicht die Tabelle einen schnellen Überblick über Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Funktionen.

MMI-Harmonisierung

Das Ergebnis der MMI-Harmonisierung, d.h. über alle Use Cases hinweg die Anforderungen aus Fahrersicht an das MMI für kooperative Funktionen zusammenzufassen und zu harmonisieren, ist im zweiten Kapitel des Deliverables D1.3 dargestellt. Dabei wurde zunächst spezifiziert, welche Varianten an kooperativer Interaktion es zwischen Fahrern geben kann (vgl. Kooperationsraum in Abbildung 12).

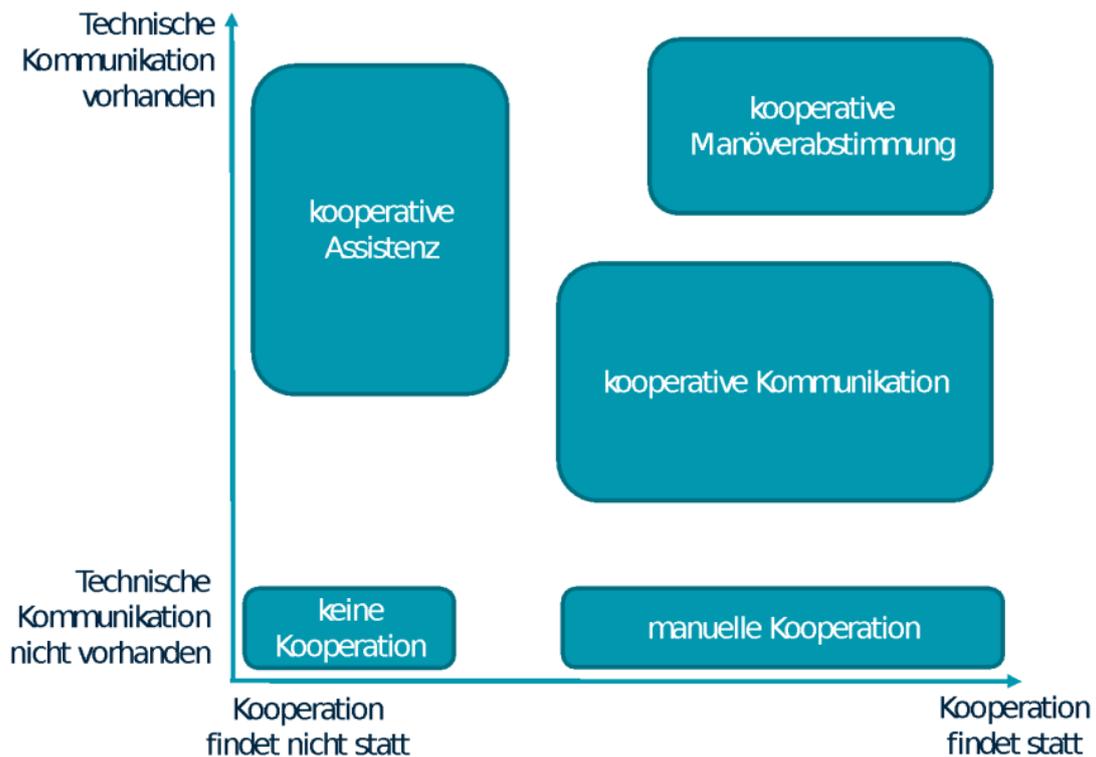


Abbildung 12: Kooperationsraum aus Fahrersicht mit den Dimensionen ‚Nutzung technischer Kommunikationsunterstützung‘ und ‚tatsächliche kooperative Abstimmung‘

Im nächsten Schritt wurden Anforderungen an die kooperativen Funktionen/Manöver aus dem Fahrbetrieb heraus abgeleitet. Diese enthalten u.a. die Gewährleistung uneingeschränkter Sicherheit für den kooperierenden Fahrer und eine Minimierung der Kosten für einen kooperierenden Fahrer. Insgesamt konnten über alle Funktionen hinweg sechs Anforderungen festgehalten werden.

Auch für die MMI-Gestaltung konnten Anforderungen aus allen Funktionen harmonisiert werden. So konnte festgehalten werden, welche Informationen ein kooperatives MMI bereitstellen muss, welche Sinnesmodalitäten dabei am besten angesprochen werden sollen und dass sich das MMI an der DIN EN 894-1 orientieren sollte.

Des Weiteren konnten die Use Cases im Hinblick auf die Anforderungen bzgl. des MMI klassifiziert werden, wobei eine Einteilung in kooperative Interaktion, kooperative Information und kooperative Verkehrsverteilung vorgenommen wurde (siehe Abbildung 13).

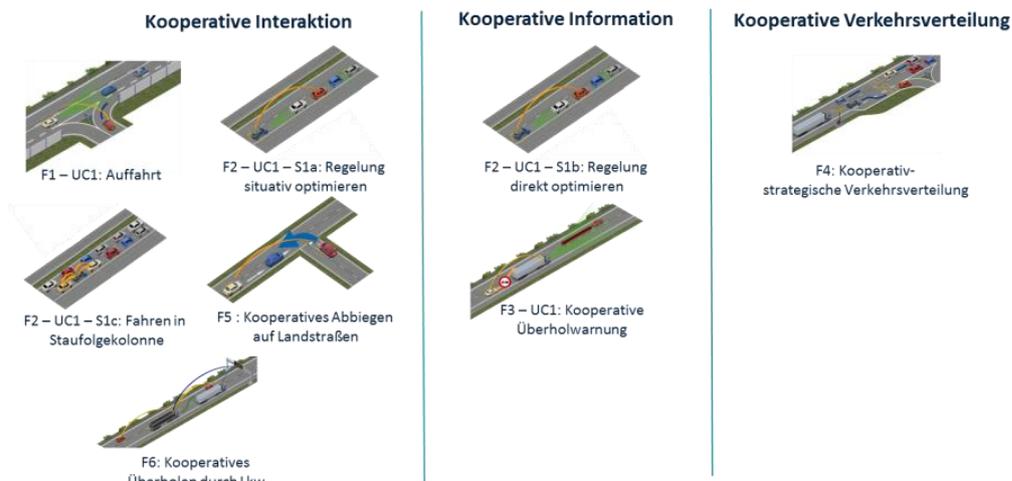


Abbildung 13: Klassifizierung der Use Cases in kooperative Interaktion, kooperative Information und kooperative Verkehrsverteilung

Nachrichteninhalte

In diesem Kapitel erfolgte eine Beschreibung und Harmonisierung der in den Funktionsbeschreibungen dargestellten, von Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur ausgetauschten Nachrichten. Dies bildet eine erste Grundlage für die Minimierung der Nachrichteninhalte durch Vermeidung von Redundanzen sowie zu einer möglichen Verringerung der Varianz durch gleiche Nachrichten für verschiedene Use Cases.

Vorevaluation Akzeptanzgrenzen

Im letzten Kapitel des Deliverables D1.3 befindet sich die Zusammenfassung der Arbeiten an der Vorevaluation zu den Akzeptanzgrenzen. Bei dieser Studie handelt es sich um den zweiten Baustein im MMI-Studienkonzept von IMAGinE, das in den Arbeitspaketen AP2.4 und AP3.5 weiterbearbeitet wurde. Dazu wurden in einer Online-Umfrage die Daten von 76 Probanden erhoben und die Daten ausgewertet und interpretiert. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bereits das Anzeigen von Kooperationsmöglichkeiten erhöht die Kooperationsbereitschaft. Außerdem sind der Fahrtrichtungsanzeiger und das Bewegungsverhalten („Platz machen“) die von den Befragten am höchsten bewerteten Anzeichen einer möglichen Kooperation und sollten daher in der Gestaltung von Kooperationsabläufen priorisiert werden. Weiter haben die Gefühlslage, Stimmung, sowie Eigenschaften des möglichen Kooperationspartners (z.B. Geschlecht, Fahrzeugtyp, Kennzeichen, etc.), einen Einfluss auf die Kooperationsbereitschaft. Zudem konnten auch Unterschiede in den betrachteten Funktionen erfasst werden. So ist eine der Empfehlungen, die Verkehrssituation bei der Erstellung eines MMI immer mit zu betrachten.

Die Vorevaluation konnte demnach eine Vielzahl von Akzeptanzkriterien und die die Kooperationsbereitschaft beeinflussenden Faktoren ermitteln, die im IMAGinE-Projekt für Studierenerstellung und Gestaltungsparameter der Mensch-Maschine Interaktion hilfreich waren.

TP1-übergreifend wurde im Rahmen von AP1.3 auch das Deliverable D1.0 „Glossar“ erstellt. Zunächst wurden 15 Begrifflichkeiten definiert, die im IMAGinE-Kontext oft genutzt werden. Deliverable D1.0 war als lebendes Dokument konzipiert – d.h. es wurde über die Projektlaufzeit hinweg sukzessive erweitert.

3.1.5 Zielerreichung

Zusammenfassend über alle Partner kann gesagt werden, dass die genannten Grundlagenarbeiten erfolgreich durchgeführt werden konnten. In AP1.1 wurden IMAGinE-Kooperationsfähigkeitsstufen (IKS) entworfen, welche in AP1.2 zur Erstellung und Analyse der Use Cases wieder aufgegriffen wurden. Die so gewonnenen Anforderungen konnten in AP1.3 erfolgreich harmonisiert werden.

3.2 TP2: Kooperative Funktionen und Systemarchitektur

3.2.1 Zielsetzung

TP2 „Kooperative Funktionen und Systemarchitektur“ hatte die Aufgabe, basierend auf den von TP1 gelieferten Anforderungen, aus Fahrersicht eine technische Spezifikation der Systemarchitektur zu entwickeln.

Nach der VHB 3.1 sind die Kernergebnisse von TP2 wie folgt definiert:

- Erarbeitung einer ersten partnerübergreifenden Rahmenspezifikation als Systemrückgrat für die Realisierung kooperativen Fahrens und alle kooperativen Funktionen.
- Spezifikation von Schnittstellen und Erstellung einer ersten Basisimplementierung mit Teilverifikation in Simulation. Sie soll die Interoperabilität der IMAGinE-Funktionen gewährleisten und dient als gemeinsame Basis der weiteren IMAGinE-Forschungsarbeiten.
- Erarbeitung relevanter MMI-Grundlagen für kooperative Systeme und Erarbeitung erster Gestaltungsvarianten.
- Entwicklung eines Abstimmungsprozesses zur fahrzeugübergreifenden Kooperation, auch auf Basis von nicht-identischem Umfeldwissen in den Fahrzeugen.
- Partnerübergreifende Zusammenfassung der vorangegangenen Arbeiten in einem Deliverable „Spezifikation der Systemarchitektur für kooperative Manöverabstimmung“.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden die Aktivitäten in TP2 folgendermaßen strukturiert:

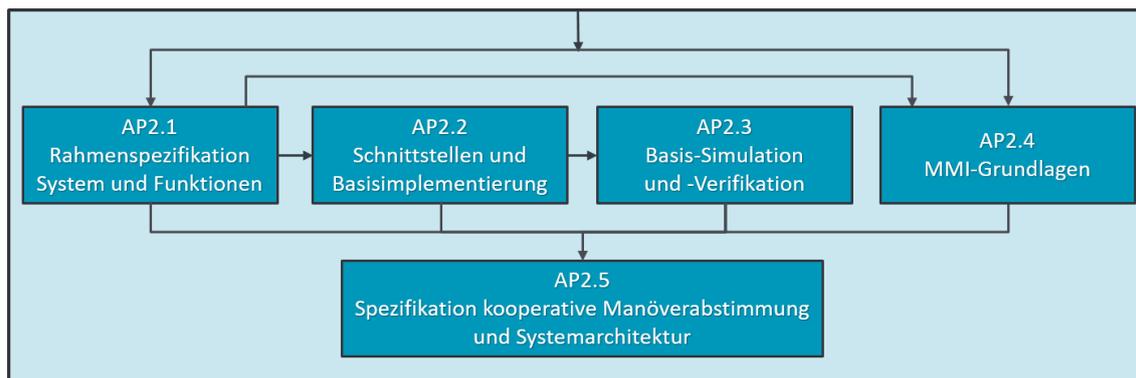


Abbildung 14: Arbeitsstruktur von TP2

AP2.1 stellte den Einstieg in die technische Lösung der kooperativen Problemstellungen und der sechs unterschiedlichen kooperativen Funktionen dar. Seine Aufgabe war es, eine Rahmenspezifikation des technischen Systems zur Umsetzung, aber auch der kooperativen Funktionen zu erstellen, die den nachfolgenden Arbeitspaketen als Basis für ihre Arbeit dienen sollte. Im folgenden AP2.2 wurden die Systemschnittstellen zwischen den einzelnen Softwarekomponenten im IMAGinE-Gesamtsystem definiert. Dies diente als Basis für ein Lastenheft, das die Arbeiten für den Unterauftrag (GUA1) darstellte und damit die weiteren Arbeiten spezifizierte. Im Arbeitspaket AP2.3 wurde die Basis-Simulation und -Verifikation zusammengefasst. Der Fokus lag auf dem Aufbau einer geeigneten Simulationsumgebung und in der Spezifikation und Umsetzung entsprechender Basis- und Simulationsszenarien für eine erste Verifikation. Die Erarbeitung relevanter MMI-Grundlagen für kooperative Systeme sowie die Erstellung erster Gestaltungsvarianten, von einer Idealwelt ausgehend, wurden in AP2.4 erledigt. Das TP2 abschließende, AP2.5 hatte zum Ziel, notwendige Ergänzungen in der Systemarchitektur aufzuzeigen und in der Verifikation den „Proof-of-concept“ zu bestätigen. Die aus den funktionalen Anforderungen abgeleiteten Schnittstellen und Regeln für die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern zur kooperativen Manöverabstimmung wurden im Hinblick auf eine potenzielle Standardisierung außerhalb von IMAGinE aufbereitet.

3.2.2 AP2.1: Rahmenspezifikation System und Funktionen

AP2.1 stellte den Einstieg in eine technische Lösung der in TP1 gefundenen unterschiedlichen kooperativen Problemstellungen und den sechs unterschiedlichen kooperativen Szenarien dar. Seine Aufgabe war es, eine Rahmenspezifikation einerseits des technischen Systems zur Umsetzung, aber auch der kooperativen Funktionen zu erstellen, die den nachfolgenden Arbeitspaketen als Basis für ihre Arbeit dienen sollte. Es sollten möglichst generische Verfahren erarbeitet werden, die es Fahrzeugen, auch unter Einbindung von Infrastruktur, ermöglichen, sich kooperativ abzustimmen. Als Vorstufe einer kooperativen Abstimmung sollten die Grundlagen für kollektive Perzeption erarbeitet werden.

3.2.2.1 Arbeitsweise

Es stellte sich früh heraus, dass die Thematik zu umfangreich und zu komplex war, um sie in einem einzigen großen Team in der gegebenen Zeit bearbeiten zu können. Daher wurden drei Arbeitsgruppen mit Vertretern jedes Partners installiert, die sich gezielt mit den drei Bereichen kooperative Manöverplanung (KOP), kollektives Umfeldmodell (UMF) und Systemarchitektur (SYS) befassen sollten.

Die Arbeitsgruppen synchronisierten sich in mindestens zweiwöchentlichen Telefonkonferenzen oder Projekttreffen.

3.2.2.2 Rahmenspezifikation der kooperativen Funktionen

Als Einstieg in die technischen Anforderungen, die sich aus einer Realisierung der sechs für IMAGinE ausgewählten kooperativen Funktionen ergeben, wurden diese hinsichtlich der Anforderungen zur Umsetzung in ein System untersucht. Dies steht im Gegensatz zu den Arbeiten in TP1, in dem die Funktionen aus Fahrersicht betrachtet worden sind. Diese Untersuchungen wurden von den jeweiligen Funktionsentwicklungsteams vorgenommen.

Die einzelnen Funktionen wurden zuerst dahingehend betrachtet, welche funktionalen Anforderungen sich gegenüber der Vorhabenbeschreibung und den Ergebnissen aus TP1 an sie noch zusätzlich ergeben. Diese wurden entsprechend dokumentiert.

Dann wurden aus den Funktionen heraus Anforderungen abgeleitet, die ein System erfüllen muss, um die Funktionen ausführen zu können. Dies bedeutete unter anderem, dass analysiert wurde, welche Eingangsdaten benötigt wurden und welche Ausgangsdaten die Funktionen bereitstellten. Diese Informationen sind wichtig, um ein IMAGinE-System mit seinen Schnittstellen definieren zu können.

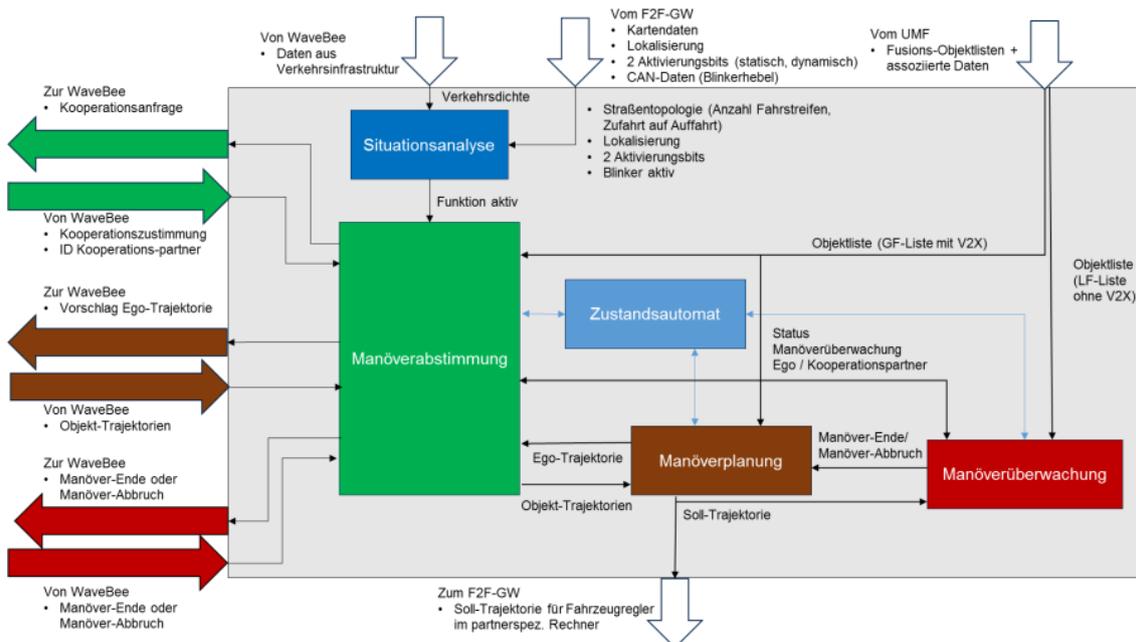


Abbildung 15: Architekturdentwurf für die Funktion F1

Ein weiterer Punkt war die Analyse, welche Information die Teilnehmer einer Kooperation untereinander abgleichen müssen, um im Sinne der Funktion erfolgreich kooperieren zu können. Diese Information beeinflusste die Auslegung des Konzeptes zur kooperativen Manöverabstimmung sowie die auszutauschenden Daten.

Auch wurden von den Funktionsentwicklungsteams Module einer möglichen Architektur identifiziert, um eine Basis für die Entwicklung einer IMAGinE-Systemarchitektur zu schaffen.

Des Weiteren haben die Teams eine Einschätzung zum Thema „Failsafe“ vorgenommen und diskutiert, inwieweit Sicherheitsaspekte bei der nachfolgenden Konzeptentwicklung betrachtet werden müssen.

Die Rahmenspezifikation der Funktionen wurde mit einer Zusammenfassung der Einzelergebnisse abgeschlossen, die die Entwicklung einer übergreifenden IMAGinE-Architektur einleitete. Übergreifende Anforderungen an die Funktionen waren bspw. dass die Funktionen grundsätzlich auf jedem Partnerfahrzeug lauffähig sein müssen und somit ihre Schnittstellen vom jeweiligen Fahrzeug und dessen Sensorausstattung abstrahiert sein müssen.

3.2.2.3 Kooperative Manöverplanung

Die kooperative Manöverplanung stellte einen Kern des IMAGinE-Projektes dar. Entsprechend fanden hier besonders intensive Gespräche statt. In einer ersten Phase wurden unterschiedliche Konzepte erarbeitet und vorgeschlagen, die oft aus den Notwendigkeiten einer einzelnen IMAGinE-Funktion heraus entstanden sind.

In einer zweiten Phase wurden diese Konzepte konsolidiert und es wurden wesentliche Merkmale erarbeitet, die ihre Eigenschaften beschreiben und die zu ihrer Eingruppierung und Bewertung herangezogen werden konnten. Diese Eigenschaften oder Kriterien wurden in folgende Felder eingeordnet:

- Funktionalität,
 - z.B. zeitlicher Prädiktionshorizont, manuelles und automatisiertes Fahren, Verkehrssicherheit, für welche Funktionen geeignet
- Robustheit,
 - gegen Kommunikationsstörungen, Fehlinterpretierung, Verfügbarkeit
- Komplexität,
 - Anzahl Elemente, implizites Wissen, Umsetzungsaufwand
- Kommunikation,
 - Realisierbar für ITS-G5 und Mobilfunk, Botschaftsgröße und -anzahl
- Skalierbarkeit,
 - Anzahl Teilnehmer, mehrere Kooperationen gleichzeitig
- Zukunftssicherheit
 - Erweiterbarkeit, Standardisierbarkeit, Internationalisierbarkeit

Als wesentliche Größe für die Unterscheidung und für die Konsolidierung wurde der Vorausschaubereich der Konzepte herangezogen. Hier wurden die Bereiche operativ-taktisch, fahrstrategisch und strategisch unterschieden. Strategisch war dabei die Funktion F4, fahrstrategisch waren die Funktionen F2 und F6. Bei den restlichen Funktionen F1, F3, F5 findet die kooperative Abstimmung auf einer operativ-taktischen Vorausschauebene statt.

3.2.2.3.1 Operativ-taktische Manöverkoordination

Der operativ-taktische Planungsbereich umfasst den Bereich von 0 bis ca. 30 Sekunden. In diesen Bereich fallen die IMAGinE-Funktionen F1 und F5, aber auch F2 und F3. Aufgrund unterschiedlicher Grundannahmen wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

- das kontinuierliche Konzept
 - Fahrzeuge senden permanent Trajektorien aus und ergänzen diese im Bedarfsfall durch kooperative Bedarfstrajektorien
- das eventbasierte Konzept
 - Fahrzeuge senden Botschaften nur zur kooperativen Abstimmung, um sich in einem konkreten Bedarfsfall abzustimmen

Beide Konzepte wurde detailliert ausgearbeitet und in einem Treffen der Arbeitsgruppe KOP ausführlich diskutiert. Letztlich wurde entschieden, das kontinuierliche Konzept im Folgenden zu favorisieren.

3.2.2.3.1.1 Kontinuierliches Konzept

Die charakteristische Eigenschaft des kontinuierlichen Konzeptes ist, dass permanent Trajektorien zwischen ausgestatteten Fahrzeugen ausgetauscht werden. Im Grundsatz folgt es folgenden Regeln:

1. Alle Fahrzeuge versenden kontinuierlich ihre geplante Trajektorie
2. Die versendeten Trajektorien müssen konfliktfrei sein
3. Auftretende Konflikte werden gelöst, durch
 - a. Adaption der geplanten Trajektorie - oder
 - b. im Fall, dass das Fahrzeug im Konfliktfall nachrangig ist - durch Versenden einer Bedarfstrajektorie
4. Wenn Konflikte bestehen bleiben, deutet das auf ein Missverständnis der Situation hin und muss durch Verzicht auf den eigenen Vorrang gelöst werden, d.h. in der Regel durch Bremsen

In einem konkreten Fahrzeug lassen sich grob drei Phasen unterscheiden, die aber mehr der Verdeutlichung dienen. Das Konzept als solches ist zustandsfrei.

Phase 1 - Grundzustand: Hier befinden sich die Fahrzeuge die meiste Zeit, da dies die Phase außerhalb von konkreten kooperativen Situationen ist.

Phase 2 - Abstimmung: Die beteiligten Fahrzeuge erkennen den Bedarf, eine bestimmte Situation kooperativ zu lösen und stimmen sich durch das Versenden von passenden Bedarfs- und Plantrajektorien über die Lösung ab.

Phase 3 - Ausführung: Die abgestimmte Lösung wird von allen Beteiligten durchgeführt und durch das weiterhin stattfindende kontinuierliche Versenden der Plantrajektorien implizit überwacht.

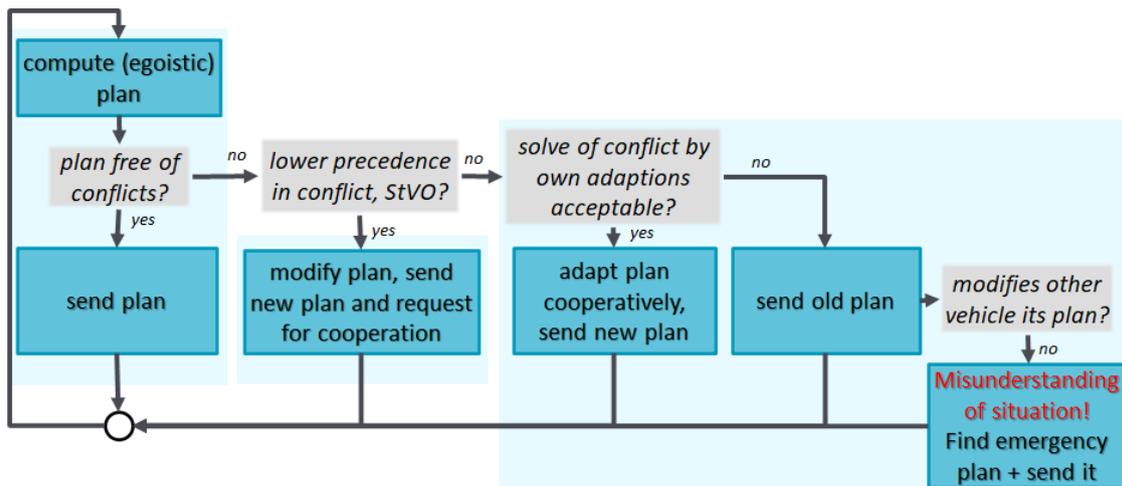


Abbildung 16: Ablaufschritte des kontinuierlichen Konzepts aus Fahrzeugsicht

Als besondere Vorteile des Konzeptes wurde festgestellt, dass es sich generisch auf alle kooperativen Situationen anwenden lässt und auch im Vorfeld bereits hilft, dass sich Fahrzeuge besser aufeinander einstellen können. Selbst Situationen, in denen die Fahrzeuge ein unterschiedliches Verständnis haben – wie z.B. unterschiedliche Ansichten über erforderliche Sicherheitsabstände beim Fahrstreifenwechsel –, können mit dem Konzept noch positiv unterstützt und so entschärft werden.

Es wurden mögliche Kombinationen von automatisiert fahrenden Fahrzeugen und manuell fahrenden Fahrzeugen dahingehend untersucht, bei welchen Varianten eine Kooperation mit dem Konzept möglich ist. Die Analyse ergab, dass dies in vielen Fällen möglich ist.

Für das Konzept wurden die Inhalte einer möglichen Kooperationsnachricht entworfen:

- Plantrajektorie
- Bedarfstrajektorie (optional)
- ID-Liste von Bedarfstrajektorien, die das Fahrzeug angenommen hat (optional)
- ID-Liste von Bedarfstrajektorien, die das Fahrzeug abgelehnt hat (optional)
- Automatisierungsgrad
- Verhandlungstimeout

Es wurden Vorüberlegungen getroffen, wie eine Trajektorie sinnvoll für die Übertragung zwischen Fahrzeugen dargestellt werden könnte. Es gibt bspw. die Varianten einer Georeferenzierung und einer fahrstreifenbasierten Frenet-Darstellung. Des Weiteren kann man die Raum-Zeitdarstellung durch einzelne Stützpunkte vornehmen oder Polynome verwenden. Die Vor- und Nachteile der Varianten wurden in Bezug auf ein trajektorienbasiertes Abstimmungskonzept theoretisch untersucht und die Ergebnisse zur weiteren Verwendung in den folgenden Arbeitspaketen dokumentiert.

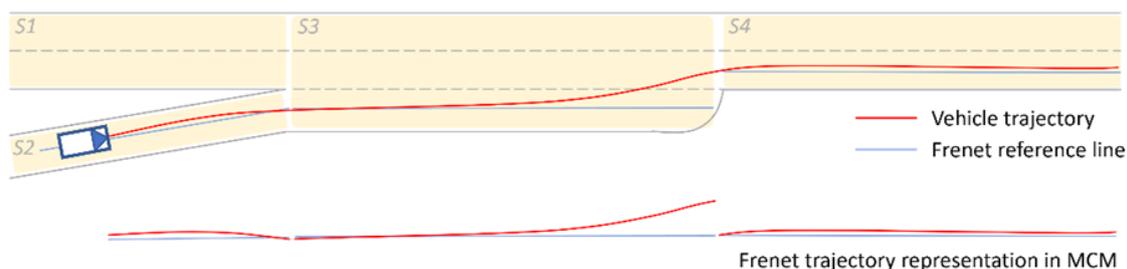


Abbildung 17: Frenet-basierte Variante für die Darstellung von Trajektorien

Als letztes wurden eine Reihe exemplarischer Störungen und Probleme herausgearbeitet und das Konzept daraufhin untersucht. Störungen können sich aus Interpretationsfehlern von notwendigen Signalen ergeben, wie dem obigen Trajektorienformat, aus dem Konzept selbst, wie z.B. der Definition von Konflikten, und vor allem aus der Kommunikation. Hier wurden u.a. die Auswirkungen von Botschaftsverlusten theoretisch betrachtet.

Aus dem Konzept zur kontinuierlichen Manöverabstimmung ergaben sich eine ganze Reihe von Anforderungen sowohl an das Fahrzeugsystem, aber insbesondere auch an einen Manöverplaner. Im Vergleich zu Konzepten, die nur in bestimmten Situationen aktiv sind, muss ein solcher Manöverplaner in der Lage sein, in jeder Situation - nicht nur in den sechs bislang definierten Szenarien - kontinuierlich Trajektorien bereit zu stellen. Im Prinzip folgte aus der Entscheidung für das kontinuierliche Konzept, dass nun im Rahmen von IMAGinE ein automatisiert fahrendes Fahrzeug entwickelt werden musste, das nicht nur die sechs IMAGinE-Situationen beherrscht, sondern auch die Strecke zwischen den Szenarien.

Die sich aus dem Konzept ergebenden Anforderungen wurden gesammelt und dokumentiert. Sie wurden in Module geclustert, die aus Sicht der Beteiligten ein generischer Manöverplaner vorweisen muss, der ein Agieren gemäß dem Konzept ermöglicht. Diese erste Clusterung bildete später die Grundlage für die Entwicklung des IMAGinE-Manöverplaners.

3.2.2.3.1.2 Eventbasiertes Konzept

Da das eventbasierte Konzept im weiteren Projektverlauf nicht weiterverfolgt wurde, wird an dieser Stelle der letzte Stand des Arbeitsergebnisses präsentiert. Gemäß dem Konzept findet die Kooperation in vier Phasen statt. Sie startet mit der Phase 1, wenn ein Fahrzeug Bedarf für eine Kooperation erkannt hat. Außerhalb der Kooperation werden keine Botschaften versendet.

- Phase 1: Umfeld informieren, Kooperation initiieren
 - Wenn ein Fahrzeug in eine potenziell kooperative Situation kommt, die es anhand seiner lokalen Sensorik oder lokalen Karte erkennt, fängt es an, Nachrichten zu versenden, um das Umfeld über seine Absichten zu informieren.
- Phase 2: Kooperationspartner ermitteln
 - Das bedürftige Fahrzeug sendet eine Anfrage an alle Fahrzeuge, ob andere Verkehrsteilnehmer bereit sind, sein gewünschtes Manöver zu unterstützen. Die Rückmeldung

erlaubt es dem bedürftigen Fahrzeug, die konkreten Partner für die nächste Phase zu ermitteln.

- Phase 3: Kooperation abstimmen
 - In dieser Phase stimmt sich das bedürftige Fahrzeug mit seinem/n Wunschpartner/n über das kooperative Manöver ab, indem das bedürftige Fahrzeug seine gewünschte Bedarfstrajektorie verschickt und das kooperierende Fahrzeug mit einer Nachricht bestätigt, die seine geänderte Trajektorie enthält.
- Phase 4: Kooperation durchführen
 - Die Partner führen die Kooperation durch und versenden dabei weiter die aktualisierten Trajektorien, die sie fahren werden.

Für das Konzept wurde ebenfalls ein Nachrichtenformat mit den folgenden Inhalten:

- COHB: CoopHeaderBlock
- TMB: Target Trajectory Message Block
- PMB: Proposed Trajectories Message Block
- CMB: Confirm Message Block

3.2.2.3.2 Kooperative Fahrstrategiekoordination

Die beiden vorstehend beschriebenen Kooperationskonzepte zielen auf eine kurzfristige, d.h. taktische Kooperation zwischen Fahrzeugen ab. Der zeitliche und örtliche Horizont ist hier durch die Länge der (planbaren) Trajektorien definiert und nicht beliebig erweiterbar.

Für die Funktionen F2 und F6 wurde allerdings ein Bedarf für eine längerfristige Kooperation ermittelt. Beim Platooning/Staufolgekolonne z.B. gibt es neben der Ebene, auf der sich Fahrzeuge über Brems- oder Beschleunigungen abstimmen müssen, auch die Ebene, auf der ein Platoon aufgebaut und gehalten werden soll oder neue Fahrzeuge längerfristig integriert werden. „F6-LKW Überholen“ ist aufgrund der typischerweise geringen Differenzgeschwindigkeit ein Vorgang, der bis zu 45 Sekunden dauert, und ggf. eine längere Vorbereitungszeit erfordert, bis eine geeignete Stelle im Straßenverlauf erreicht ist.

Für diese Kooperationsebene, der Fahrstrategie, wurde daher ein eigenes Konzept entworfen. Dieses basiert auf der Idee eines verteilten, synchronisierten Zustandsautomaten. Die verschiedenen Phasen eines Überholmanövers oder die verschiedenen Untersituationen eines Platoons werden dabei als jeweils eigene Zustände definiert. Per V2X-Kommunikation tauschen die Fahrzeuge nun ihre aktuellen und gewünschten zukünftigen Zustände aus. Sind sich alle über den nächsten gewünschten Zustand einig, findet ein gleichzeitiger kollektiver Wechsel statt. Aufgrund seiner Implementierung ist den Fahrzeugsystemen bekannt, welche Aufgaben in einem bestimmten Zustand abzarbeiten sind.

Der Mechanismus des Konzeptes ist generisch, die Zustände und ihre Bedeutung für das jeweilige involvierte Fahrzeug sind für jedes unterstützte kooperative Szenario unterschiedlich.

Die Zustände für die beiden Funktionen F2 und F6 wurden für das Konzept 'Kooperative Fahrstrategiekoordination' erarbeitet und in einer abstrakten Beschreibung ausformuliert.

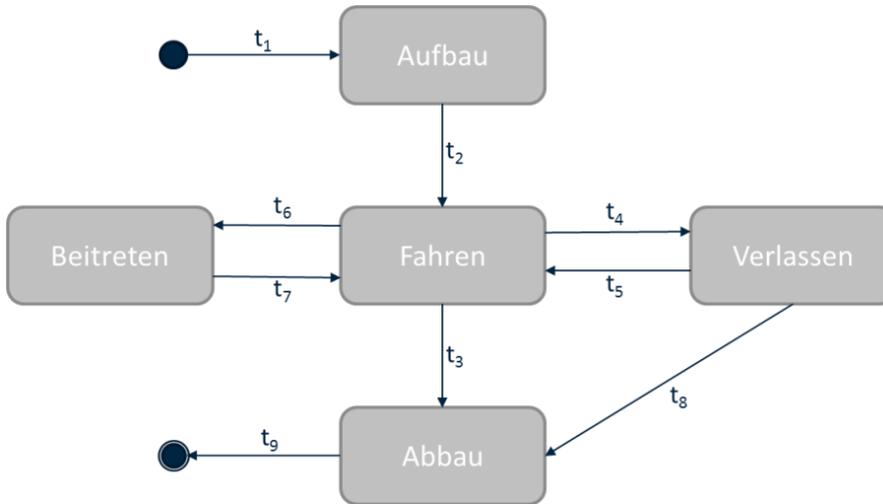


Abbildung 18: Verteilte Zustände für Staufolgefahrt

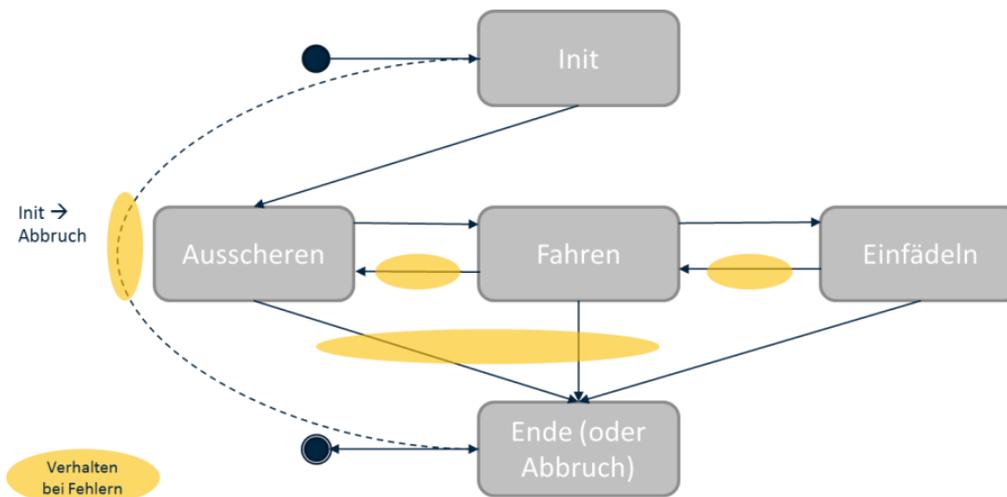


Abbildung 19: Verteilter Zustandsautomat für die Funktion F6

Die operative-taktische Feinjustierung, z.B. wie stark ein Platoon beschleunigt oder wo ein Lkw wieder einschert, kann dabei entweder über die Trajektorien des eigenständigen operativ-taktischen Konzeptes oder über Zustand-spezifische Botschaftsinhalte beim Versenden des eigenen Zustands vorgenommen werden.

3.2.2.3.3 Strategische Verkehrsverteilung

Bei der strategischen Verkehrsverteilung (Funktion F4) ist im Gegensatz zu den anderen Funktionen die Infrastruktur beteiligt. Außerdem treffen die Fahrzeuge hier eine weitreichende Entscheidung über ihre zukünftige zu fahrende Route. Daher wurde hierfür ein eigenes Konzept entwickelt, das spezifisch für die Problematik der Abstimmung von Navigationsrouten ist.

Dazu ermitteln die Fahrzeuge im Vorfeld sogenannte Score-Werte, bei denen die individuellen Vorlieben aus unterschiedlichen Gebieten, wie z.B. Reisezeit, verbrauchsarmes Fahren, Sight-seeing, Fern/Nahverkehr oder Fahrzeuggewicht, mit individuellen Gewichten zu einem Score-Wert zusammengefasst werden. Wenn sich eine Situation für eine Abstimmung ergibt, z.B. vor einem Stau vor einer Autobahnabfahrt, wird von der Infrastruktur eine Abstimmungszone und eine Referenzverkehrsverteilung versendet. Alle Fahrzeuge innerhalb der Abstimmungszone versenden dann ihre jeweiligen Score-Werte und berechnen für sich aus allen empfangenen Scores einen Schwellwert zwischen von der Autobahn abfahrenden und auf der Autobahn verbleibenden Fahrzeugen so, dass sich die von der Infrastruktur empfohlene Verteilung ergibt. Je nachdem, ob der eigene Score nun oberhalb oder unterhalb der Schwelle liegt, wird an den Fahrer eine Empfehlung zum Verlassen oder Verbleiben auf der Autobahn ausgesprochen.

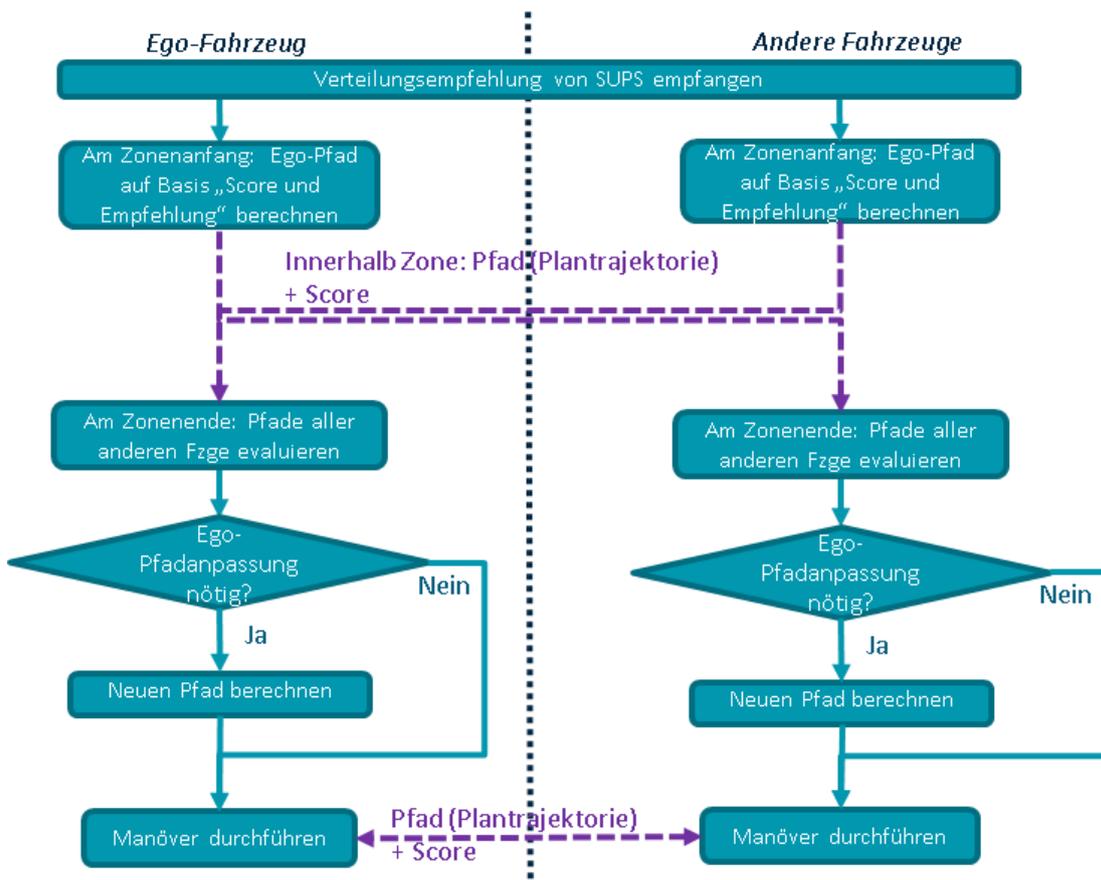


Abbildung 20: Interaktionen zwischen den Fahrzeugen bei der Funktion F4

3.2.2.4 Kollektive Perzeption

Im Rahmen der Arbeiten zur kollektiven Perzeption sollten Mechanismen definiert werden, mit denen Fahrzeuge untereinander ihre Sensordaten austauschen können, um ihre Sicht der Umwelt zu erweitern.

Es wurden verschiedene Varianten diskutiert, welche Daten übertragen werden, wie eine sinnvolle Fusion vollzogen wird. Besondere Randbedingungen waren zum Beispiel beschränkte Bandbreite für übertragene Daten und möglichst geringe Latenz. Um die Latenz gering zu halten, ist einerseits eine möglichst hohe Senderate wünschenswert und zum anderen sollten die Daten möglichst dicht am Sensor abgegriffen werden, denn jede Fusion von Daten verändert sie durch die stattfindende Filterung und erhöht damit auch die Latenz. Als besonders wertvoll auch im Hinblick auf die kooperative Manöverplanung wurde die Information über erkannte Objekte angesehen. Eine Herausforderung stellt die Vielzahl unterschiedlicher Sensortypen, wie Kamera, Lidar oder Radar, dar und deren spezifischen Eigenschaften von unterschiedlichen Herstellern. Es wurden Möglichkeiten entwickelt, wie diese durch möglichst generische Messgrößen erfasst und dann beim Empfänger genutzt werden können.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden eine Aufgabenbeschreibung für das IMAGinE-Umfeldmodell sowie eine Liste von vorläufig noch groben Anforderungen an ein Konzept abgeleitet. Ein wichtiges Ergebnis war zum Beispiel, dass die Fusion von lokalen und fremden Sensordaten vollständig im Fahrzeug verbleibt; es werden also nur Sensordaten ausgetauscht, aber keine final fusionierten Objektlisten. Somit ist die Sicht der Fahrzeuge zwar erweitert, aber nicht identisch.

Diese noch groben und allgemeinen Konzeptbeschreibungen wurden im Folgenden detaillierter spezifiziert und zu einer Architektur eines kollektiven Umfeldmodells ausgearbeitet. Diese Architektur enthielt bereits die wesentlichen Funktionsblöcke. Mit Rücksicht auf die beschränkten Ressourcen des Projektes wurde drei mögliche Ausbaustufen vorgesehen.

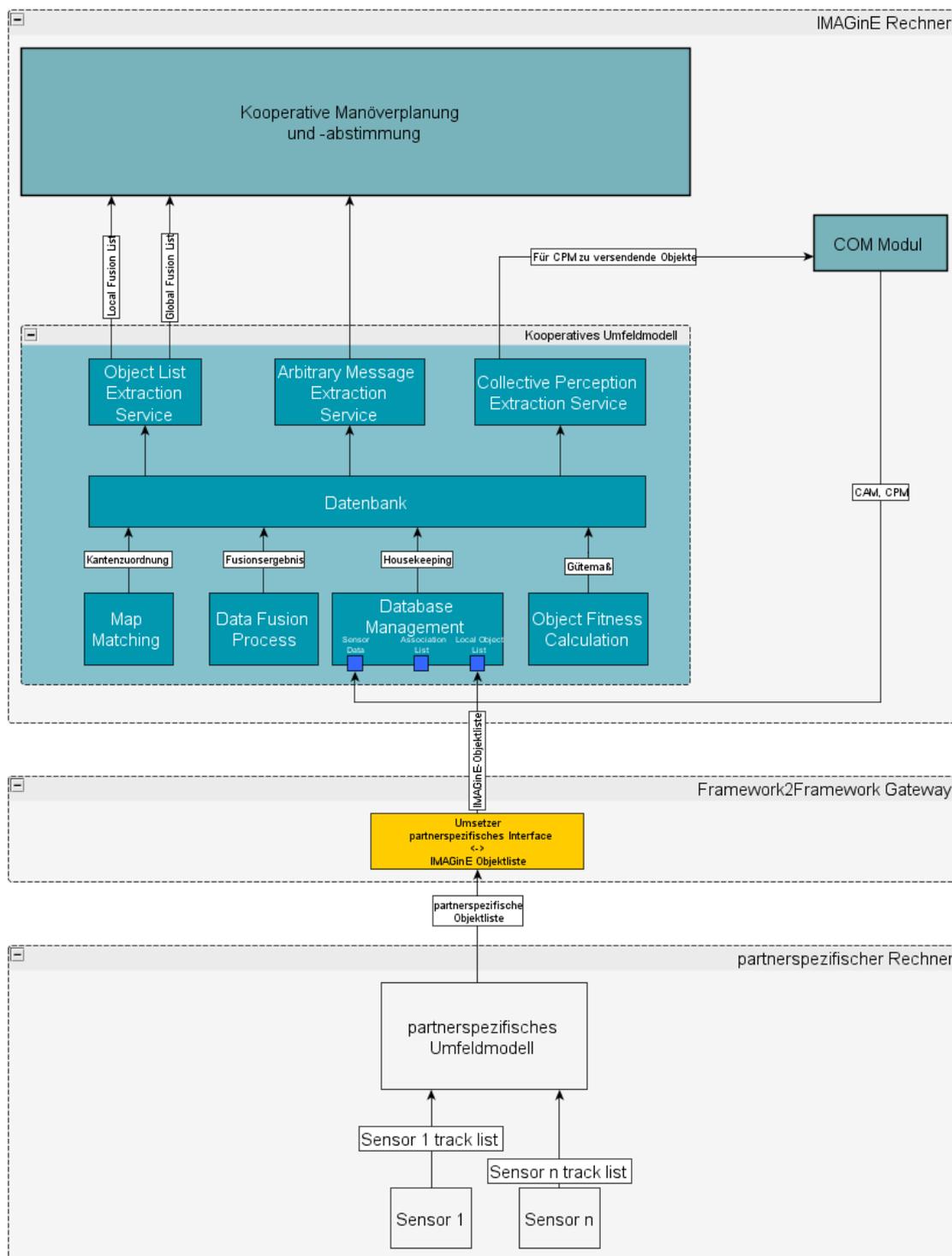


Abbildung 21: Entwicklungsstufe 1 für das gemeinsame IMAGinE-Umfeldmodell – Objektlisten-fusions-Ansatz

In der ersten und einfachsten Stufe, der Objektlisten-Fusion, wird von jedem Fahrzeug eine Objektliste versandt, die entweder aus der partnerspezifischen lokalen Fusion oder - noch einfacher - von einem einzigen Sensor stammen kann. Diese Daten werden dann auf der Empfängerseite in einem kollektiven IMAGinE-Umfeldmodell verarbeitet, das auf die Fusion von Objektlisten ausgelegt ist. Diese sind dann entweder die lokale Objektliste oder empfangene Objektlisten lokaler Sensoren. Für die Fusion werden mitgelieferte Varianzen der Objekteigenschaften genutzt, um unterschiedliche Genauigkeit zu berücksichtigen. Das neue Umfeldmodell liefert auf seiner Ausgangsseite eine fusionierte Objektliste, die zum Beispiel von der kooperativen Manöverplanung verwendet werden kann. Zusätzlich wird ein Modul vorgesehen, das die Aufbereitung der eigenen lokalen Sensorobjektliste für die Versendung an andere vornimmt.

Die assoziationslistengestützte Sensorfusion als Stufe 2 geht einen Schritt weiter und nutzt sowohl die Sensortrack-Listen der Onboard-Sensorik als auch das Assoziationsergebnis der lokalen partnerspezifischen Objektfusion. Hier werden bereits Filterkaskaden vermieden.

Die letzte Stufe 3, der Sensorfusions-Ansatz, nutzt ebenfalls die Tracklisten der lokalen Onboard-Sensorik, empfängt aber über V2X zusätzliche Objektinformationen. Diese Informationen sind sowohl aus CAM- als auch aus CPM-Botschaften von anderen kommunikationsfähigen Fahrzeugen nutzbar. Dieses Modul realisiert eine eigenständige Assoziation und Fusion der Tracklisten.

Aus den drei verschiedenen Ansätzen wurden dann detaillierte Anforderungen an eine Realisierung und auch Anforderungen für die Systemarchitektur abgeleitet. Insbesondere wurden die Schnittstellen nach außen auf einer noch relativ abstrakten Ebene definiert.

3.2.2.5 System- und Funktionsarchitektur

Aus der Vorhabenbeschreibung und den nach und nach verfügbaren Zwischenergebnissen der Arbeitsgruppen zum kooperativen Umfeldmodell (UMF) und der kooperativen Manöverplanung (KOP) wurden die Rahmenbedingungen für eine Systemarchitektur für ein IMAGinE-System abgeleitet. Diese sind u.a.:

- eine gemeinsame Entwicklungsplattform für kooperative Funktionen zu entwickeln, die sich in die bestehenden, partnerspezifischen Versuchsarchitekturen integrieren lässt
- eine Rechnerumgebung für gemeinsame Funktionsentwicklung zu definieren
- die Einbindung einer zentralen Positionsdatenquelle
- die Einbindung von Simulationsprogrammen zu ermöglichen, um bestimmte Teilaspekte simulationsgestützt testen zu können

Aus diesen wurde dann ein erster Vorschlag für eine verfeinerte Architektur entwickelt, die von den nachfolgenden Arbeitspaketen weiterentwickelt wurde.

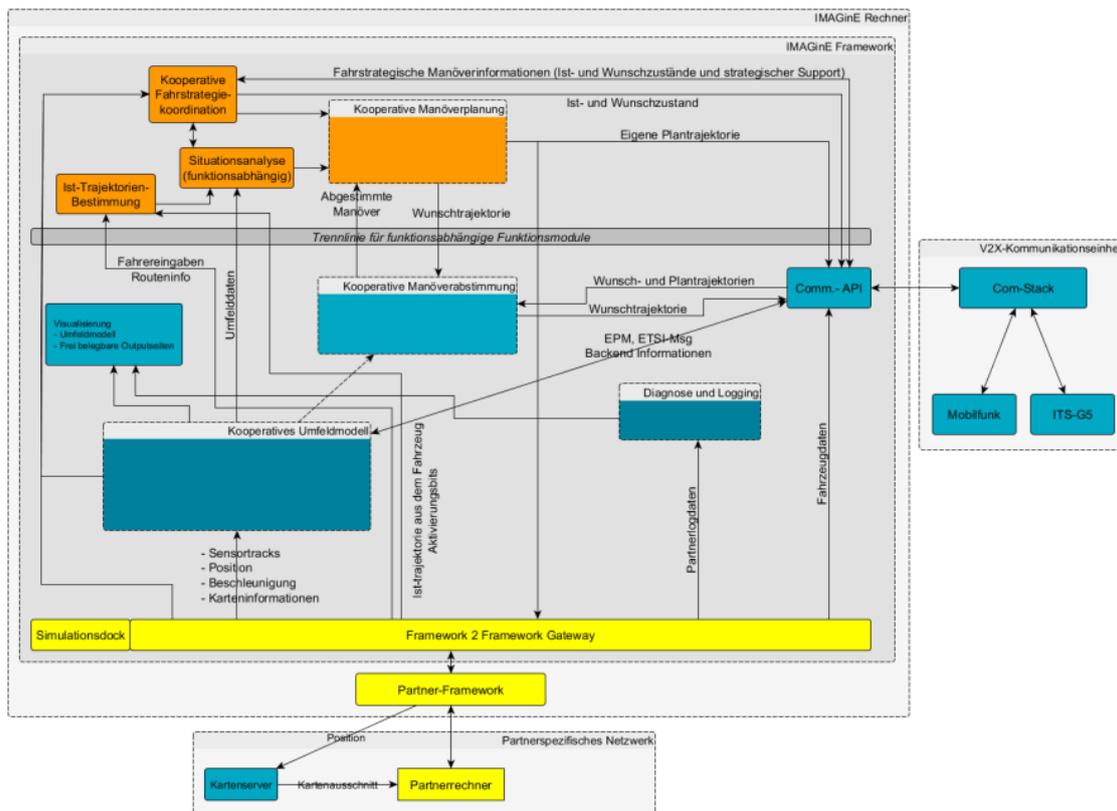


Abbildung 22: In AP2.1 erarbeitete erste verfeinerte Systemarchitektur

Der IMAGinE-Rechner war der PC, der die gemeinsamen IMAGinE-Softwaremodule beheimatete und der von allen Partnern in ihren Fahrzeugen eingesetzt wurde. Hier liefen z.B. die Softwaremodule des kollektiven Umfeldmodells, des kooperativen Manöverplaners und der Module zu fahrstrategischer und strategischer Kooperation.

Ein zentrales Modul war das Framework2Framework Gateway, das die wichtige Trennung zwischen den partnerspezifischen Systemen / Simulation und den für alle Partner gleichen IMAGinE-Komponenten gewährleistet. Erst dadurch wurde es möglich, ein IMAGinE-System in diversen Partnerfahrzeugen zu nutzen. Die Anforderung aus der Vorhabenbeschreibung, einige IMAGinE-Funktionen bzgl. ihrer Umsetzbarkeit für niedrig- bzw. nicht-automatisiertes Fahren zu untersuchen, wurde in der Definition des Framework2Framework passend berücksichtigt. Somit wurden gezielte MMI-Studien möglich.

Die Schnittstellen des Framework2Framework Gateway wurden auf abstrakter Ebene gesammelt und im Deliverable D2.1 dokumentiert.

Im Rahmen von AP2.1 wurden auch die Anforderungen an die Kommunikation betrachtet. Es wurden technische Lösungen aufgezeigt, die gewährleisten, dass die kooperative Abstimmung und die kollektive Perzeption möglichst unabhängig von dem physikalischen Layer sind und damit sowohl über Nahbereichsfunk, wie z.B. ITS-G5, als auch über verfügbare Fernkommunikation wie LTE einsatzfähig sind.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Simulation gelegt, da die Simulation gerade bei einer Fahrzeug-übergreifenden Kooperation, bei der naturgemäß mehr als ein Fahrzeug beteiligt ist, besonderen Herausforderungen unterliegt, aber auch besonderen Nutzen bringt. Dabei wurden verschiedene Einsatzzwecke, bei denen Simulation im Laufe des Projektfortschritts zum Tragen kommt, unterschieden und bzgl. ihrer Besonderheiten in der Rahmenspezifikation beschrieben. Allgemein wurden Simulationsumgebungen für das kooperative Umfeldmodell, die kooperative Abstimmung und die fahrzeugübergreifende Kommunikation betrachtet. Eine besondere Variante war die Vehicle-in-the-Loop (ViL) bzw. Prototype-in-the-Loop-Methode (PiL), bei der im Realfahrzeug die anderen Fahrzeuge durch die Simulation nachgebildet werden.

Als letztes wurden im Rahmen von AP2.1 bereits erste Schritte unternommen, um für IMAGinE-gemeinsame Software einen Entwicklungsprozess zu definieren. Die Ergebnisse wurden im Deliverable D2.1 dokumentiert und von AP4.2 fortgeführt.

3.2.2.6 Ergebnis

Die Ziele des Arbeitspaketes, eine Rahmenspezifikation des Systems und der kooperativen Funktionen zu erstellen, wurden zeitgerecht erreicht. Es wurde ein dreistufiges Konzept für kollektive Perzeption erarbeitet, inklusive einer groben Architektur. Für die kooperative Abstimmung von Verkehrsteilnehmern sind drei Konzepte entwickelt und bis hinunter zu einem Grobentwurf der benötigten Nachrichten beschrieben worden. Die drei Konzepte fokussieren auf je eine der drei unterschiedlichen Planungsebenen operativ-taktisch, fahrstrategisch und strategisch.

Die Ergebnisse wurden im Deliverable D2.1 dokumentiert.

3.2.3 AP2.2: Schnittstellen und Referenzimplementierung

Das Arbeitspaket AP2.2 von Teilprojekt 2 hatte zwei Hauptziele. Das erste Ziel umfasste die Spezifikation der Systemschnittstellen zwischen den einzelnen Softwarekomponenten im IMAGinE-Gesamtsystem. Als zweites Ziel wurde auf dieser Basis dann ein Lastenheft erstellt, das zur Ausschreibung des gemeinsamen Unterauftrages (GUA1) diente. Das Lastenheft enthielt die Referenzimplementierung aller Softwaremodule eines von sieben IMAGinE-Auftraggebern gemeinsam beauftragten Kooperationskonzepts. Die Referenzimplementierung wurde im nachfolgenden AP2.3 in einer Simulationsumgebung in einer Reihe von Testszenarien für mehrere kooperative IMAGinE-Funktionen (teil-)verifiziert. Referenzimplementierung und „Proof-of-Concept“-Simulation wurden zusammen im GUA1 von TP2 spezifiziert, ausgeschrieben, beauftragt und betreut.

Jeder Partner konnte sein eigenes Konzept zur Manöverabstimmung verfolgen. Gegenüber GUA1 alternative, ergänzende oder erweiterte Verfahren wurden sowohl in der Literatur als auch innerhalb von IMAGinE in einem „Addendum“ zur GUA1-Ausschreibung und weiteren Dokumenten beschrieben. Die IMAGinE-Systemschnittstellen wurden daher so gestaltet, dass sie den erforderlichen Datenaustausch aller in IMAGinE benannten Verfahren abdecken und auch für künftige Verfahren grundsätzlich erweiterbar sind.

Zum Erfolg des AP2.2 haben weitere IMAGinE-Arbeitspakete wesentlich beigetragen:

1. Die detaillierte Spezifikation der zur gemeinsamen Beauftragung geplanten Manöverabstimmungskonzepte erfolgte im Arbeitspaket AP3.2. Architekturübersichten und die Detail-Spezifikationen aller Software-Module zur kooperativen Manöverabstimmung wurden aus AP3.2 in das GUA1-Lastenheft übernommen.
2. Die Spezifikation der Umfeld-Schnittstellen zu den Kartendaten (MAP-API) und den dynamischen Umgebungsobjekten erfolgte AP-übergreifend unter Federführung von AP3.1 und wurde von dort in das GUA1-Lastenheft übernommen. MAP-Server und MAP-API aus der parallel in AP3.1 erfolgten Beauftragung des GUA2 wurden für GUA1 beigestellt.
3. Die detaillierte Spezifikation der kooperativen Nachrichtenformate auf Signalebene über spätere Luftschnittstellen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit AP3.3.
4. Für Simulation und Versuchsträger gemeinsam anzuwendende Mechanismen, u.a. zum Nachrichtenaustausch zwischen Modulen über das ROS (Robot Operation System, <https://www.ros.org>) sowie zur Konfiguration und Ablaufsteuerung, wurden mit AP3.4 und TP4 abgestimmt.

3.2.3.1 Arbeitsweise

AP2.2 startete im Juni 2017 und wurde im März 2021 vollständig abgeschlossen. Es wurden zwei Arbeitsgruppen für die beiden Themenbereiche Schnittstellen und GUA1 gebildet.

Die Arbeitsgruppen trafen sich in mehreren Präsenzmeetings und in wöchentlichen Online-Meetings. Die Spezifikation und das GUA1-Lastenheft wurden in enger Zusammenarbeit mit AP2.3, AP3.2 und AP3.3 erstellt.

3.2.3.2 Systemschnittstellen

In AP2.2 wurden systeminterne Schnittstellen inkl. der verwendeten Datentypen zwischen den folgenden IMAGinE-Hauptkomponenten spezifiziert:

- Kommunikation (COM)
- Kooperative Manöverplanung und Abstimmung (KOP)
- Kooperatives Umfeldmodell (UMF)
- Framework2Framework Gateway (FGW)

Die folgende Grafik stellt die Systemarchitektur mit ihren Hauptkomponenten dar:

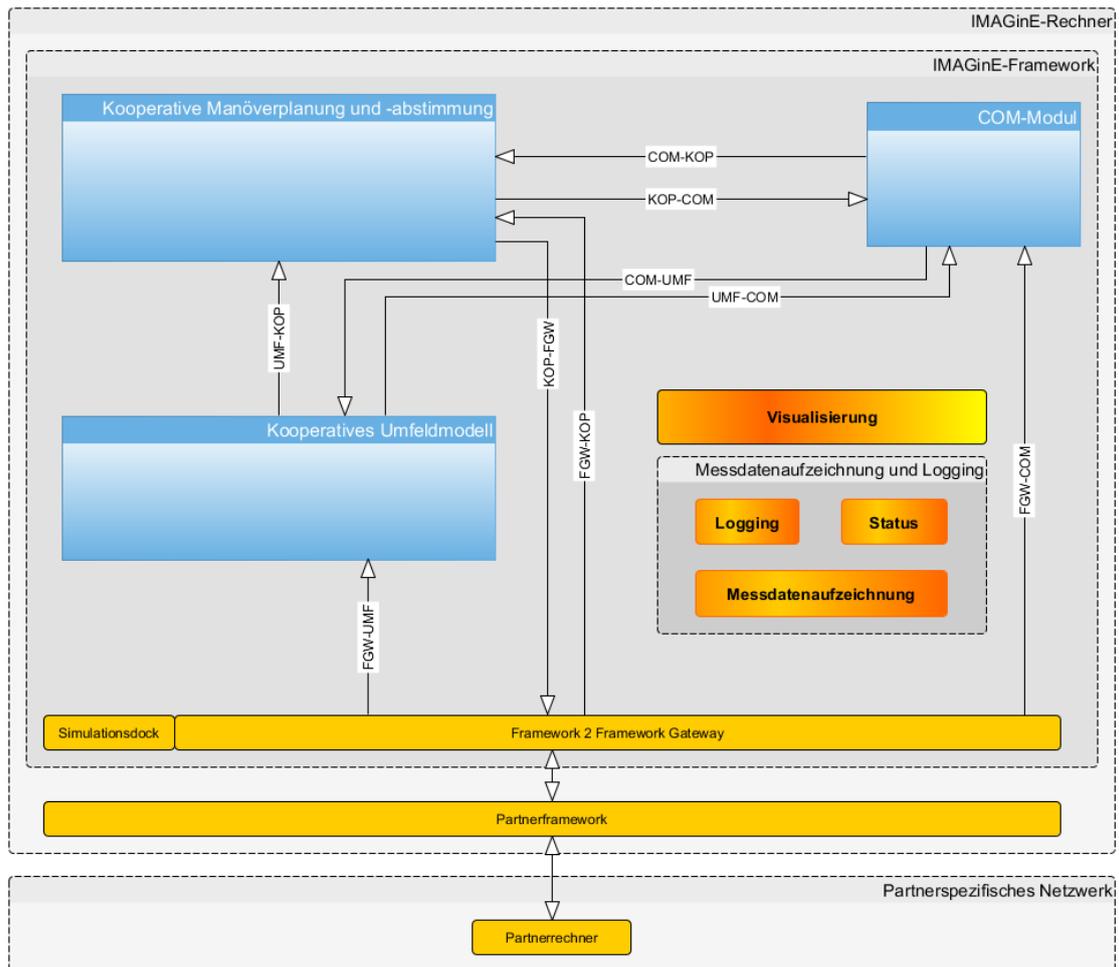


Abbildung 23: IMAGinE Systemarchitektur

Teil des in AP2.1 gemeinsam spezifizierten IMAGinE-PC ist auch das Framework ROS. Die spezifizierten Schnittstellen werden daher über ROS als Publish-Subscribe-Mechanismus zur Verfügung gestellt.

Sämtliche IMAGinE-Schnittstellen und Datentypen wurden in GUA1 und Deliverable D2.2 vollständig dokumentiert.

3.2.3.3 Lastenheft GUA1, Ausschreibung und Beauftragung

Zur Vorbereitung der Ausschreibung von GUA1 wurde seitens aller IMAGinE Projektpartner eine Liste möglicher Auftragnehmer erstellt, an die das Lastenheft verschickt wurde.

In Besprechungen mit den potenziellen Auftragnehmern wurde das Projekt IMAGinE, die Anforderungen und der grobe Inhalt von GUA1 vorgestellt. Die Auftragnehmer hatten anschließend die Möglichkeit, sich vorzustellen und ihre Idee zur Realisierung zu umreißen. Abschließend hatten die IMAGinE-Projektpartner die Möglichkeit, Fragen an den potenziellen Auftragnehmer zu stellen. Eine entsprechende Liste mit den wichtigsten Fragen wurde vor dem Meeting ausgearbeitet.

Nach Prüfung der Angebote wurde eine Aufwandsschätzung und Risikobewertung seitens der Projektpartner vorgenommen und der gemeinsam ausgewählte Auftragnehmer mit der Umsetzung von GUA1 beauftragt.

3.2.3.4 Ergebnisse

Die Erstellung von Lastenheft, Beauftragung und Umsetzung erwies sich als große Herausforderung. Durch unterschiedliche Ansätze bei der kooperativen Manöverabstimmung und durch das sehr komplexe Themengebiet kam es während der Laufzeit von AP2.2 immer wieder zu Verzögerungen und letztendlich sogar zu Umfangskürzungen. Durch zusätzliche Eigenleistung der Projektpartner konnte dennoch eine solide Systemarchitektur zur Umsetzung von kooperativen Fahrmanövern geschaffen werden.

Diese wurde erfolgreich anhand der Showcases im Rahmen des Projekts in den anschließenden APs evaluiert, eingesetzt und auf der Abschlussveranstaltung live im Fahrzeug präsentiert.

Das in AP2.2 erstellte IMAGinE-Gesamtsystem steht allen Projektpartnern als solide Basis zur weiteren Forschung und Entwicklung von kooperativen Funktionen zur Verfügung.

3.2.4 AP2.3: Basis-Simulation und -Verifikation

Ziel von AP2.3 waren der Aufbau einer geeigneten Simulationsumgebung und die Spezifikation bzw. Umsetzung entsprechender Basis-Simulationsszenarien für eine erste Verifikation der kooperativen Manöverabstimmung. Sowohl die Umsetzung der kooperativen Manöverabstimmung in Software als auch deren Teilverifikation wurden im Rahmen des ersten gemeinsamen Unterauftrages GUA1 durchgeführt. Das Arbeitspaket schuf die Grundlagen für eine nachgelagerte konsortiumsinterne Weiterentwicklung und Implementierung in die realen Fahrzeuge.

AP2.3 startete im September 2017 und endete nach Abschluss des ersten gemeinsamen Unterauftrages und einer konsortiumsseitigen Optimierungs- und Verifikationsphase im Oktober 2021. Im Wesentlichen wurden folgende Themen bearbeitet:

- Definition von Anforderungen an die Simulation für die prototypische Implementierung der kooperativen Funktionen
- Integration der relevanten Softwarekomponenten in eine erste Gesamtsimulation für die kooperative Manöverabstimmung
- Begleitung und Unterstützung von GUA1 mit Schwerpunkt Simulation sowie der technischen Gesamtfunktionalität
- Abnahme und Verifikation der GUA1-Lieferungen mittels Simulation

Zwischen AP2.3 und AP3.4 „Technikorientierte Simulation“ fand eine enge Zusammenarbeit statt. So konnten, aufbauend auf den bereits im AP2.2 referenzierten IMAGinE-Arbeitspaketen und sich überschneidenden Softwarekomponenten aus GUA2 (Details siehe AP3.1), eine Vielzahl von Beistellungen zu GUA1 identifiziert, implementiert und für die Anwendung in eine erste

Gesamtsimulation integriert werden. Diese wurde während der Laufzeit von GUA1 und GUA2 kontinuierlich verbessert und an neue Anforderungen angepasst.

Die partnerübergreifenden Arbeiten wurden insbesondere mit dem Versionskontrollsystem Git (<https://git-scm.com/>) mittels eines web-basierten, konsortiumsinternen GitLab (IMAGinE-GitLab) verwaltet und somit allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Unter anderem wurde es auch für die Bearbeitung des im TP2 verorteten gemeinsamen Unterauftrags GUA1 genutzt. Das GitLab wurde so strukturiert, dass die Arbeiten der Partner und der GUA-Auftragnehmer möglichst unabhängig voneinander durchgeführt werden konnten. Dies ermöglichte eine effiziente Verwaltung sowohl von IMAGinE-internen als auch IMAGinE-externen (GUA1, GUA2) Entwicklungszweigen an einer zentralen Stelle.

Im Rahmen von AP2.3 wurden erstmalig alle notwendigen Komponenten zu einer Gesamtsimulation zusammengeführt, die sich zur Entwicklung der in IMAGinE spezifizierten kooperativen Manöverplanung und -abstimmung einsetzen ließ. Innerhalb der Vorhabenbeschreibung wird diese erste Gesamtsimulation als Basis-Simulation bezeichnet. Aufgrund der großen Überschneidungen mit anderen Arbeitspaketen hat sich projektweit jedoch die Begrifflichkeit IMAGinE-Simulationsumgebung etabliert und wird auch im Folgenden genutzt. Diese Simulationsumgebung wurde für GUA1, GUA2 und die Projektpartner zunächst auf der Basis der für IMAGinE weiterentwickelten Simulationsumgebung CarMaker erstellt. Sie stand auch als Basis für andere, partnerspezifische Simulationsaufbauten zur Verfügung, die über ein Framework2Framework-Gateway (FGW) bzw. Framework2Simulation-Gateway (F2S-GW) an die gemeinsam erstellten IMAGinE-Komponenten angebunden werden konnten.

Zwecks Verifikation des IMAGinE-Konzepts wurden zu jeder kooperativen Fahrfunktion F1 bis F6, sowie einem „Autopiloten“ (konsortiumsintern auch als „F7“ bezeichnet) jeweils mehrere Szenarien in unterschiedlichen Varianten definiert. Ziel war es, mittels Simulation dieser Szenarien und durch Auswertung der daraus gewonnenen Daten die Funktionstauglichkeit des IMAGinE-Konzeptes nachzuweisen (Proof-of-Concept). Die Auswertung sollte basierend auf einer geeigneten Auswahl von unabhängigen Variablen (z.B. Startpositionen und Geschwindigkeit der Fahrzeuge) und abhängigen Variablen (z.B. Manöverdauer oder Unfall) durchgeführt werden.

Ein exemplarisches Szenario, das vorwiegend bei der Verifikation des IMAGinE-Konzeptes für die Funktion F1 verwendet wurde, ist nachfolgend illustriert. In diesem Szenario fahren ein Fahrzeug auf dem Autobahn-Zubringer (Fzg1) sowie zwei Fahrzeuge auf der Autobahn (Fzg2, Fzg3). Letztere behindern zunächst das erste Fahrzeug bei seinem Vorhaben auf die Autobahn aufzufahren, was durch die Kooperation im Sinne des IMAGinE-Konzeptes ermöglicht werden soll. Ein Test mittels Simulation dieses Szenarios galt dann als bestanden, wenn sich die Fahrzeuge auf der Autobahn kooperativ verhielten und eine ausreichend große Lücke erzeugten, in die sich das erste Fahrzeug erfolgreich einfädeln konnte.

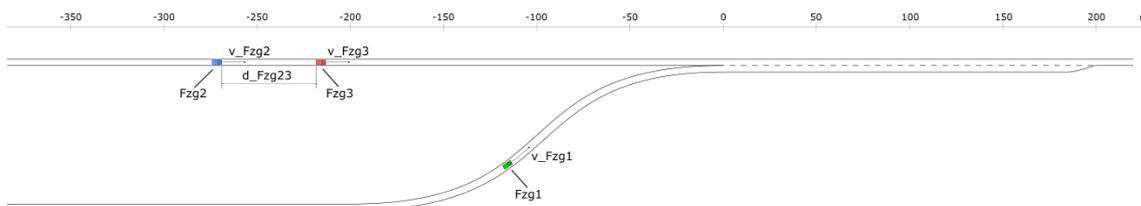


Abbildung 24: Exemplarisches Szenario für die Funktion F1 – initialer Zustand

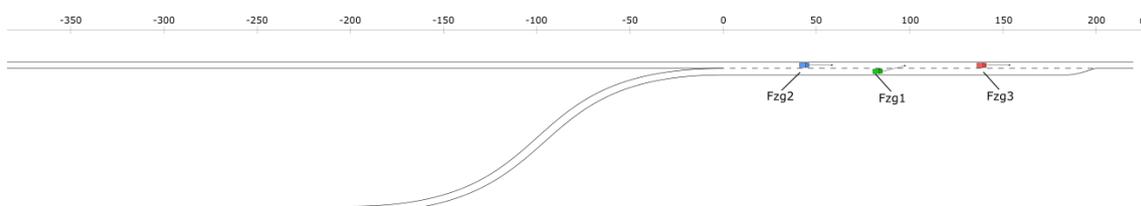


Abbildung 25: Exemplarisches Szenario für die Funktion F1 – finaler Zustand (erfolgreiche Kooperation)

Die Szenarien wurden in Form von Katalogen sowohl in der IMAGinE-Simulationsumgebung und zum Teil auch in partnerspezifischen Simulationslösungen aufgebaut und unter anderem zur Verifikation der IMAGinE-Funktionen verwendet. Die IMAGinE-Simulationsumgebung besteht dabei aus der Simulationssoftware CarMaker bzw. TruckMaker und einer entsprechenden Anbindung an das IMAGinE-System inkl. dem Modul zur kooperativen Manöverplanung und -abstimmung (KOP-Modul). Die Anbindung ist mit dem Robot Operating System (ROS, <https://www.ros.org/>) realisiert. Die IMAGinE-Simulationsumgebung ermöglicht die Simulation von mehreren Fahrzeugen als gleichberechtigte, selbstständige Verkehrsteilnehmer mit Fokus auf realistischer Fahrdynamik und Ausstattung mit entsprechender Sensorik (Ego-Fahrzeuge). Sie unterstützt umfassende Optionen zur Testautomatisierung, Datenaufzeichnung und -auswertung sowie grafischer Visualisierung. Die V2X-Kommunikation zwischen den Fahrzeugen kann über unterschiedlich detaillierte Modelle realisiert werden. Relevante V2X-Inhalte werden idealisiert oder mit parametrierbaren Effekten (z.B. Reichweite, Nachrichtenverlust und Verzögerung) über das ROS-Netzwerk verteilt.

Eine exemplarische Konfiguration der IMAGinE-Simulationsumgebung ist unten abgebildet. Innerhalb der in RViz (<http://wiki.ros.org/rviz>) umgesetzten IMAGinE-Visualisierung (1) werden sowohl das eigene Fahrzeug als auch weitere IMAGinE- und Nicht-IMAGinE-Fahrzeuge (Fahrzeuge ohne IMAGinE-System) dargestellt (2). Neben dem visualisierten IMAGinE-Straßenmodell, das auch für die kooperative Manöverplanung herangezogen wird, werden die für das Kooperationskonzept relevanten Bezugs- (rot), Bedarfs- (grün) und Alternativtrajektorien (blau) dargestellt. In einer dynamischen Vorschau können sowohl das Geschwindigkeitsprofil (3) als auch die momentanen Kosten unterschiedlicher Trajektorien (4) analysiert werden. Die Visualisierung der Simulationsumgebung (5) liefert eine realistische Abbildung der aktuellen Fahrsituation. Zu Debugging-Zwecken liefert das ROS-Framework Werkzeuge, mit denen unter anderem die Anzahl der relevanten IMAGinE-Nachrichten beobachtet werden (6) und beispielsweise eine Kooperation abgeleitet werden kann. Zur Analyse von Zeitverläufen wurde bei mehreren Partnern

neben partnerspezifischen Werkzeugen auch das frei verfügbare Tool PlotJuggler (<http://wiki.ros.org/plotjuggler>) eingesetzt (7).

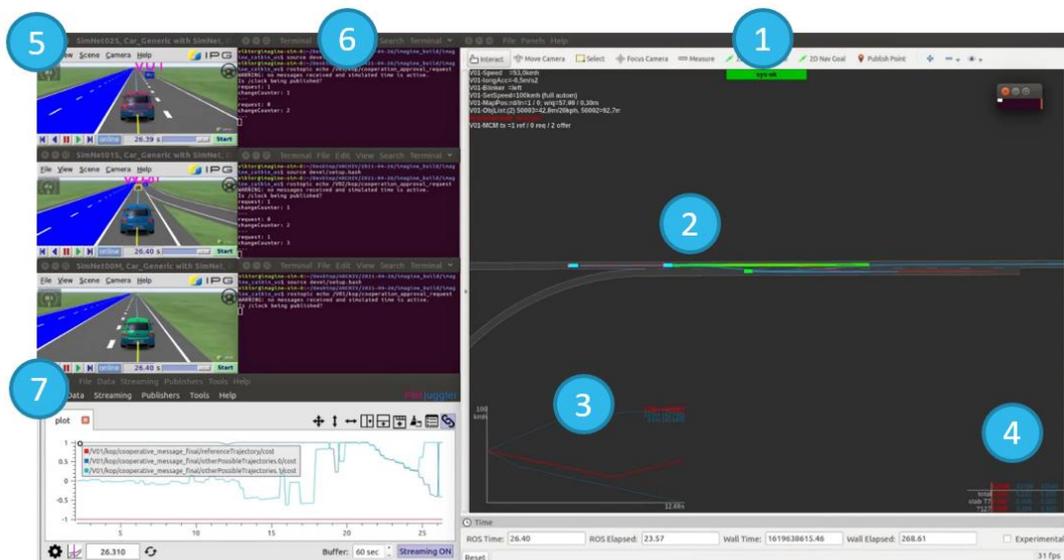


Abbildung 26: Exemplarische Konfiguration der IMAGinE-Simulationsumgebung

Durch das Konsortium wurden für die Bearbeitung von GUA1 eine Vielzahl von Softwarekomponenten bereitgestellt. Sie wurden von den IMAGinE-Partnern arbeitspaketübergreifend spezifiziert, umgesetzt und auch im Rahmen der gemeinsamen Unteraufträge erweitert. Die folgende Tabelle listet die zentralen Komponenten auf, die zu Beginn des Unterauftrages zur Verfügung gestellt wurden. Im Detail wurden die Komponenten in den spezifischen Dokumentationen im IMAGinE-GitLab und in den Deliverables der entsprechenden Arbeitspakete dokumentiert.

Tabelle 5: Zentrale Softwarekomponenten der IMAGinE-Simulationsumgebung

Id	Name	Kurzbeschreibung
1	IMAGinE Map-API	Die Map-API/Library erleichtert das Arbeiten mit dem IMAGinE-Straßenmodell. Die API bekommt als Input eine Botschaft vom Typ T_RoadModel. Für diese stellt sie allgemein nützliche Funktionen bereit, die z.B. ein Map Matching / Lane Matching einer gegebenen Position durchführen. Die API lässt sich grob in drei Teile einteilen: Funktionen zum Management der API (Initialisieren und Inhalt updaten), Hilfsfunktionen (Attributwerte ermitteln) und die eigentlichen Anwenderfunktionen (MapMatching, Geschwindigkeitsbegrenzung ermitteln).
2	IMAGinE-Schnittstellen als ROS IDL	Die im Projekt spezifizierten Datentypen sind in der von ROS verwendeten Interface Description Language (IDL) implementiert und als .msg-Dateien hinterlegt (http://wiki.ros.org/Msgs).
3	IMAGinE Common-API	Die API wurde genutzt, um die Abhängigkeiten zu ROS bzw. Framework-spezifischen Funktionen zu verringern. Hierunter fallen unter anderem Funktionen für das Logging und die Zeitmessung sowie vordefinierte C++ Klassen. Neben der API selbst ist auch ein ROS-Knoten verfügbar, der die API exemplarisch anwendet.
4	Prototypisches IMAGinE-System für die Simulation mit dem Framework2Simulation Gateway	Erweiterung von CarMaker um zusätzliche Komponenten für IMAGinE in Form einer Bibliothek als ROS1-Knoten. Insbesondere mit Framework2Simulation Gateway mit simulationsseitigen UMF-, FGW-, COM-Interface und rudimentärer ROS V2X-Kommunikation sowie Synchronisierung zwischen der Simulationsumgebung und den IMAGinE ROS-Knoten.
5	Simulation mehrerer Ego-Fahrzeuge	Erweiterung für die Simulationsumgebung CarMaker zur Interaktion mehrerer IMAGinE-Fahrzeuge in einer gemeinsamen Umwelt.
6	Anbindung an das IMAGinE-Framework ROS	Erweiterung für die Simulationsumgebung CarMaker zur Anbindung an das Softwareframework ROS (ROS1).
7	Manipulation der Fahrzeugführung	Fahrzeugführung entlang einer Trajektorie im Simulationskoordinatensystem mit dem Modul IPGDriver Trajectory Control.
8	Kartenkonverter für das IMAGinE-Kartenformat	Konverter vom CarMaker ROAD5-Format in das IMAGinE-Kartenformat (reine Konvertierung des Straßenformats ohne Modul zur Interpretation der Karte).
9	Simulationsszenarien	Testkatalog für die Funktionen 1-7 mit CarMaker Simulationsszenarien und simulationsnaher Berechnung von exemplarischen Kennwerten sowie Integration in die unten genannte Testautomatisierung.

Id	Name	Kurzbeschreibung
10	Testautomatisierung	Grundstruktur für die Testautomatisierung und simulationsnahe Berechnung von Kennwerten mit ScriptControl als Car-Maker TestWare Paket.

Ergebnisse

Das zentrale Ergebnis von AP2.3 ist eine an die IMAGinE-Simulationsumgebung angebundene, exemplarische Umsetzung der IMAGinE-Manöverabstimmung basierend auf den Aktivitäten rund um den ersten gemeinsamen Unterauftrag GUA1. Im Gegensatz zur ursprünglichen inhaltlichen Planung (entsprechend dem durch das Konsortium erarbeiteten GUA1-Lastenheft) konnten insbesondere aufgrund des enormen Umfangs und der Komplexität des Gesamtsystems nicht alle vorgesehenen IMAGinE-Funktionen umgesetzt werden. Ebenso wurde trotz eines intensiven Austauschs zwischen Konsortium und dem Unterauftragnehmer auch die erhoffte Güte und Reife nur für Teilkomponenten erreicht. Dennoch war es auf dieser Grundlage möglich, die Ziele der abhängigen Arbeitspakete zu erreichen.

Die funktionalen Komponenten wie der Autopilot (F7), die F1 „Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen“ sowie Kernkomponenten der teilweise implementierten F5 „Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen“ wurden von einigen Partnern bereits während der Laufzeit des Unterauftrages weiterentwickelt und dem Unterauftragnehmer zur Verfügung gestellt. Das Ergebnis dieser Weiterentwicklung konnte erfolgreich im Rahmen von TP4 in die Simulation sowie in die realen Fahrzeuge integriert werden. Die Simulationsumgebung bildete ebenfalls die Grundlage für die Evaluation innerhalb der TP5-Arbeitspakete. Die Funktionen F2 „Kooperative Längsführung auf Autobahnen“, F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“ und F6 „Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen“ basieren auf eigenen Abstimmungskonzepten. Sie wurden wie die Funktion F3 „Kooperatives Überholen auf Landstraßen“, die kein eigenes Abstimmungskonzept benötigt, nicht mehr im Rahmen von GUA1, sondern partnerseitig realisiert. Analog zu den Funktionen F1 und F5 nutzt F4 als Basis ebenfalls Softwarekomponenten aus GUA1.

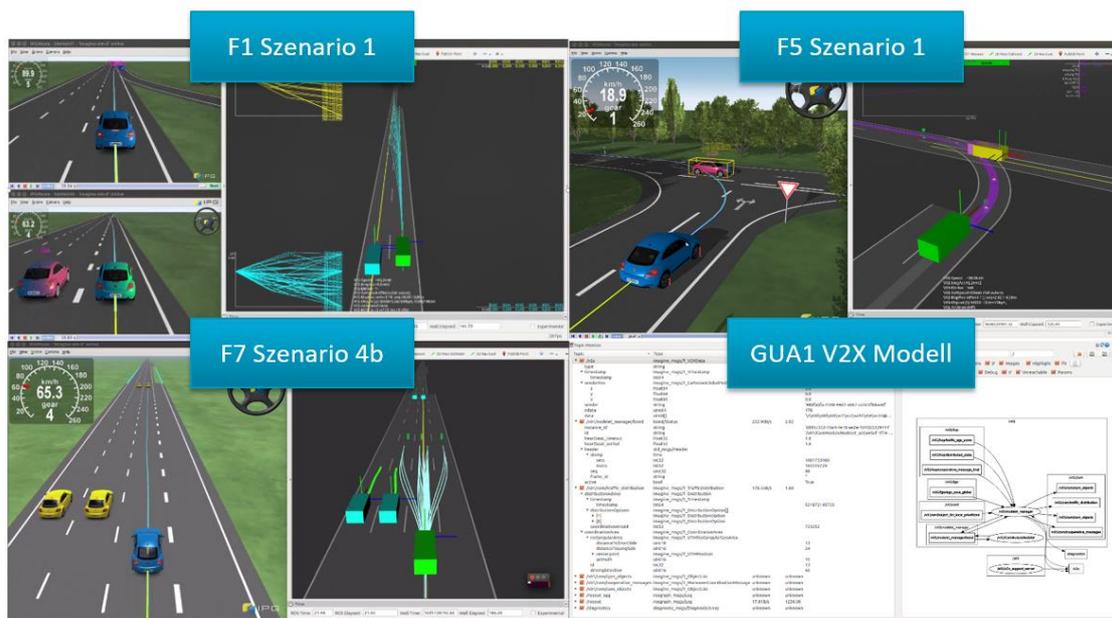


Abbildung 27: Beispielhafte GUA1-Ergebnisse : F1, F5, Autopilot (F7) und ROS-basiertes V2X-Kommunikationsmodell

Die Beauftragung von GUA1 umfasste auch ein Arbeitspaket „Verifikation“, in welchem eine Reihe von Szenarien zur Verifikation des in GUA1 implementierten Kooperationskonzepts spezifiziert und bereitgestellt wurden. Die Szenarien wurden für Tests der vom Unterauftragnehmer erhaltenen Lieferungen genutzt und für neue Anwendungsfälle angepasst. Ursprünglich sollte anhand dieser Szenarien nach erfolgreicher Implementierung der IMAGinE-Funktionen vom Unterauftragnehmer ein Proof-of-Concept des Kooperationskonzepts in Simulation unter Aufzeichnung von Messdaten und Ableitung von Kenngrößen erfolgen. Allerdings hatte sich während der Bearbeitung herauskristallisiert, dass die gewählte Art der Beauftragung für eine derart komplexe Software nicht ideal war. Der Fokus wurde im Unterauftrag daher auf die Entwicklung der zentralen Komponenten gelegt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für die Umsetzung mehr Flexibilität hinsichtlich der Software-Implementierung notwendig gewesen wäre und für zukünftige Vorhaben berücksichtigt werden sollte.

Mit dieser Einschränkung konnte der ursprünglich in AP2.3 geplante Proof-of-Concept auf Basis der verfügbaren GUA1-Lieferungen nicht durchgeführt werden. Die im Rahmen von GUA1 nicht umgesetzten IMAGinE-Funktionen wurden aber während der Laufzeit von GUA1 durch Eigenimplementierungen der funktionsverantwortlichen Partner realisiert. Eine simulative Verifikation des Proof-of-Concepts für die Funktionen F1 bis F6 wurde von den entsprechenden Partnern im Rahmen von AP2.5 durchgeführt.

3.2.5 AP2.4: MMI-Grundlagen

Ziel von AP2.4 war die Erarbeitung relevanter MMI-Grundlagen für kooperative Systeme sowie die Erstellung erster Gestaltungsvarianten, die von „Idealwelt“-Bedingungen ausgingen und deren Wirkungen empirisch untersucht wurden.

Aus der generischen Abfolge der Funktionsschritte (vgl. AP1.3) wurde eine Auflistung von Fragestellungen bzgl. einer geeigneten Mensch-Maschine-Interaktion abgeleitet. Eine inhaltliche (bezogen auf Fragestellungen und IMAGinE-Funktionen/Use Cases) und zeitliche Abstimmung der verschiedenen empirischen Untersuchungen der beteiligten Partner wurde vorgenommen sowie ein Vorgehen zur Abstimmung mit den weiteren Partnern in TP2 definiert.

Im Folgenden werden die Arbeiten der Partner kurz vorgestellt, die im Rahmen des Arbeitspakets Studien in der Fahrsimulation planten und durchführten (Opel, TUM FTM, TUM LfE, VW, WIVW). Für eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Studie sei hiermit auf die Partnerspezifischen Schlussberichte verwiesen.

Opel verfolgte das Ziel, eine Untersuchung zur Fahrerintentionserkennung beim manuellen Fahren durchzuführen. Diese Studie wurde im Rahmen eines Unterauftrags bearbeitet, der zusätzlich erhobene Daten ausgewertet hat, die während der zweiten, am WIVW durchgeführten Probandenstudie am Fahrsimulator erhoben wurden. Ziel dieser Datenauswertung war die Erstellung einer Fahrermodellierung für niedrige Automationslevel, d.h. insbesondere für manuelle Trajektorien.

Die Forschungsarbeit des Lehrstuhls **TUM-FTM** fokussierte auf die Entwicklung und Evaluation geeigneter MMI-Konzepte für den Lkw-Bereich und hierbei auf die IMAGinE-Funktionen F2 und F6. Die folgende Auflistung enthält die durchgeführten Studien:

1. Vorstudie F2: Informationsinhalt für Lkw-Fahrer im Stauplatoon [Literaturanalyse & Workshop]
2. Vorstudie1 F6: Ist-Zustand Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen [empirische Studie]
3. Vorstudie2 F6: Informationsinhalt eines kooperativen Assistenten für Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen [Expertenbefragung]
4. Entwurf & Vorevaluation F2, F6: Generisches MMI-Konzept zur Steigerung der Kooperationsbereitschaft bei Lkw-Fahrern [Literaturanalyse & Expertenevaluation]
5. Hauptstudie F2, F6: Evaluation MMI-Konzepte [empirische Studie]

Der Lehrstuhl **TUM-LfE** fokussierte auf das Design und die Untersuchung von Gamification-Konzepten und die Analyse verschiedener Gestaltungsparameter (Dominanz, Modalität, Informationsart) eines MMI für kooperative Systeme. Im Folgenden werden die durchgeführten Studien aufgelistet:

1. Akzeptanz von Gamification-Ansätzen [empirische Studie]
2. Gestaltungsparameter MMI-Konzepte [empirische Studie]

3. MMI-Gestaltung & Evaluation unter Berücksichtigung der vorigen Ergebnisse [empirische Studie]

VW untersuchte die Auswirkungen von subjektiv empfundenen Kosten einer kooperativen Verhaltensweise und die Auswirkungen der subjektiv wahrgenommenen Eindeutigkeit der Intention des Kooperationspartners auf die Interaktionsprozesse.

1. Auswirkung subjektiver Kosten und wahrgenommener Intention auf Interaktion/Kooperation [empirische Studie]

Zentraler Fokus der Arbeit des **WIVW** waren die drei Probandenstudien im Fahrsimulator (statischer High-End-Simulator mit einem vollständigen Fahrzeug als Mockup). Die folgende Auflistung stellt die durchgeführten Studien dar:

- 1. Fahrerverhalten bei F1, F3 und F5 und Akzeptanz visueller MMI-Konzepte [empirische Studie]**
- 2. Fahrerakzeptanz optimierter HMI-Variante inkl. L2-Automatisierung [empirische Studie]**
- 3. Optimierung HMI und Szenarienvarianten [empirische Studie]**

Die Arbeiten der Partner wurden in Deliverable D2.4 „MMI-Studien und Interaktionskonzept“ detailliert berichtet (Umfang: 436 Seiten). Im Dokument stellten alle AP-Partner ihre Arbeiten vor und erarbeiteten damit gemeinsam die relevanten MMI-Grundlagen für kooperative Systeme sowie erste Gestaltungsvarianten, die von „Idealwelt“-Bedingungen ausgehen und deren Wirkungen empirisch untersucht wurden. Weiterhin wurden in diesem Deliverable die Anforderungen an das MMI eines Systems zum kooperativen Fahren beschrieben (z.B. Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit von system- und fahrerinitiierten Zustandswechseln, Verständnis der Implikationen für das eigene Verhalten). Am Ende des Dokuments wurden Leitlinien der MMI-Gestaltung für kooperatives Fahren abgeleitet. Die erstellten Leitlinien der MMI-Gestaltung gliedern sich in

- Use Case-übergreifende MMI-Prinzipien (z.B. Darstellungsweise, die Fahrer nicht unnötig visuell belastet)
- Leitlinien zur Funktionsweise und -charakteristik kooperativer Assistenz (z.B. kann beim automatisierten Fahren auf eine situationsspezifische Kooperationsanfrage an den Kooperationsgewährenden verzichtet werden)
- Hinweise zur Methodik der Evaluation (z.B. zeigen Vergleiche mit in der Literatur berichteten Ergebnissen, dass Probandenstudien in der Fahrsimulation eine valide Untersuchungsmethode darstellen).

Die Ziele des Arbeitspakets wurden mit den abgeleiteten Leitlinien der MMI-Gestaltung erreicht. Diese dienten als Grundlage für die MMI-Arbeiten im weiteren Projektverlauf. Detaillierte Informationen können den partnerspezifischen Veröffentlichungen und Abschlussberichten entnommen werden.

3.2.6 AP2.5: Spezifikation kooperativer Manöverabstimmung und Systemarchitektur

Das Arbeitspaket AP2.5 hatte zum Ziel, die Arbeitsergebnisse der vorangegangenen TP2-Arbeitspakete zur Umsetzung und Simulation der kooperativen Manöverabstimmung aufzuarbeiten. Es fasst die Erkenntnisse zur Rahmenspezifikation und deren Proof-of-Concept-Umsetzung mit Blick auf potenziell notwendige Ergänzungen der Systemarchitektur zusammen. Im Rahmen von IMAGinE wurden neben der gemeinsam beauftragten Umsetzung einer kooperativen Manöverplanung auch verschiedene partnerspezifische Konzepte zur Manöverabstimmung erarbeitet, die eine Kooperation zwischen Fahrzeugen ermöglicht. Der Fokus von AP2.5 lag bei den IMAGinE-Partnern sowohl auf der Integration und Erweiterung der gemeinsam beauftragten Software zur kooperativen Manöverabstimmung als auch auf der Implementierung und der Proof-of-Concept-Verifikation der partnerspezifischen Konzepte in Simulation und in den Fahrzeugen. Im dazugehörigen Deliverable D2.5, das auf der IMAGinE-Website (www.imagine-online.de) veröffentlicht wurde, wurden die Manöverabstimmungskonzepte jenseits des in D2.1 definierten und gemeinsam beauftragten Verfahrens beschrieben. Jeder Partner hatte hierzu sein eigenes Konzept zur Manöverabstimmung dargestellt. Neben dem gemeinsam beauftragten Verfahren, wurden alternative, ergänzende oder erweiterte Verfahren sowohl in der Literatur als auch innerhalb von IMAGinE in weiteren Dokumenten beschrieben.

Die im IMAGinE-System definierten Schnittstellen wurden so gestaltet, dass sie den erforderlichen Datenaustausch aller in IMAGinE benannten Verfahren abdecken und auch für künftige Verfahren grundsätzlich erweiterbar sind. Die Basisimplementierungen der einzelnen Manöverplaner und Abstimmungskonzepte wurden in einer Simulationsumgebung in einer Reihe von Testszenarien für mehrere kooperative IMAGinE-Funktionen verifiziert (Proof-of-Concept-Verifikation). Zudem wurden die gemeinsamen Komponenten der IMAGinE-Architektur als Gesamtsystem dargestellt und notwendige Anpassungen, welche sich als Ergebnis aus der Simulation ergaben, aufgezeigt. Angesichts der Fülle an unterschiedlichen kooperativen Manöverabstimmungskonzepten, wie sie im Rahmen von IMAGinE partnerübergreifend erarbeitet wurden, verständigten sich die Partner auf einige Gemeinsamkeiten in den Versuchssystemen, um die Komplexität in diesem Schritt zu reduzieren. Dafür wurde eine Referenzarchitektur definiert, die einen partnerspezifischen Anteil, aber auch einen gemeinsamen, den kooperativen, Anteil beinhaltet. Die gemeinsamen Komponenten sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

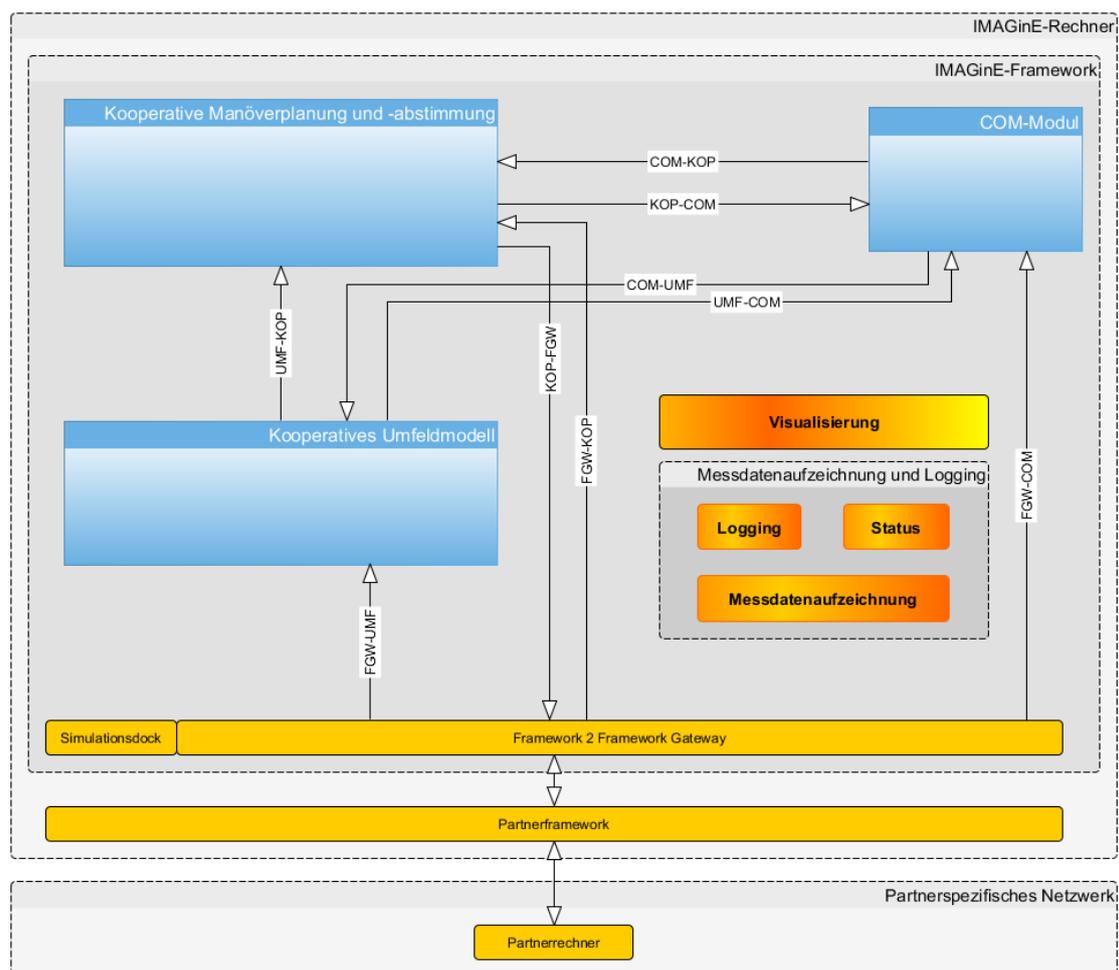


Abbildung 28: Referenzarchitektur für kooperatives Fahren in IMAGinE

Die Anbindung an das Partnersystem erfolgte über ein Framework2Framework-Gateway, das von jedem Partner in Eigenregie erstellt werden musste, um die eigenen Systeme an die kooperativen IMAGinE-Systeme anzubinden. Einzelne, kooperative Komponenten konnten auch durch partnereigene Implementierungen ausgeführt werden oder liefen innerhalb der gemeinsamen Software in der partnerspezifischen Umgebung. Für diese Lösungen waren jedoch die Partner selbst verantwortlich und trugen Sorge dafür, dass die gemeinsamen Schnittstellen innerhalb des eigenen Fahrzeugs bzw. des eigenen Simulators richtig bedient wurden.

Die Module „Kooperatives Umfeldmodell“ und „Kooperative Manöverplanung und -abstimmung“ sind in der Abbildung grundsätzlich die in den gemeinsamen Unteraufträgen entstandenen Softwaremodule. Da sich im Laufe des Projekts, wie bereits oben erwähnt, unterschiedliche partnerspezifische Varianten der Manöverabstimmung herausgebildet haben, existierten im Projekt mehrere Manöverplaner, die jeweils andere Manöverabstimmungsverfahren umsetzen. Dadurch kam es bei den unterschiedlichen Partnern zu Abweichungen von der Referenzarchitektur. Die Abweichungen und grundsätzlichen Konzepte der einzelnen Projektpartner kön-

nen im D2.5 nachgelesen werden. Die Module „Kooperatives Umfeldmodell“ und „Kommunikationsmodul (COM-Modul)“, welches vom Partner Nordsys zur Verfügung gestellt wurde, wurden von allen Partnern gleichermaßen in den Umsetzungen und Tests zur Konzeptverifikation verwendet.

Die im Rahmen des Projektes IMAGinE entstandenen Konzepte der Partner sind in der nachfolgenden Übersicht zusammengefasst. Dabei wurden die Konzepte gemäß ihren wesentlichen Eigenschaften in verschiedene Kategorien eingeordnet. Zudem kann der Tabelle entnommen werden, welche Funktionen für die Verifikation herangezogen wurden.

Tabelle 6: Zusammenfassung der in IMAGinE verwendeten kooperativen Manöverabstimmungsansätze

Konzept	Projektpartner	Charakteristik	Planungsprinzip	Abstimmungsprinzip	Luftschnittstelle	Fahr-funktion
IMAGinE 2018	Robert Bosch GmbH Continental Teves AG & Co. ohG	implizit kontinuierlich dezentral	Intentionen	Konflikt	MCM	F1
			taktisch operativ	global lokal	1 Bezugs-Trajektorie 0-n Bedarfs-Trajektorien 0-m Alternativ-Trajektorien (mit Kosten)	F5
pre-IMAGinE 2015	Volkswagen AG	implizit kontinuierlich dezentral	Intentionen	Konflikt	MCM	F1
			taktisch operativ	global lokal	1 Plan-Trajektorie 0-1 Wunsch-Trajektorien	F3
OpelCore 2018/19	Opel Automobile GmbH	implizit kontinuierlich dezentral	Intentionen	Konflikt	MCM	F1
			taktisch operativ	lokal	1 Trajektorie (Bezug/Bedarf/Angebot)	
AltTraj 2018	Opel Automobile GmbH	implizit kontinuierlich dezentral	Intentionen	Konflikt sonstiges Ereignis	MCM	
			taktisch operativ	global	1 ideale Trajektorie 0-1 Zöger-Trajektorien	
Targets 2019	Opel Automobile GmbH	implizit kontinuierlich dezentral	Intentionen	Konflikt	andere	
			strategisch taktisch operativ	global	1 langfristiges Ziel 1-n mittelfristige Ziele n-m kurzfristige Ziele	
	BMW AG		Relationen	sonstiges Ereignis	MCM	F1

Konzept	Projektpartner	Charakteristik	Planungsprinzip	Abstimmungsprinzip	Luftschnittstelle	Fahr-funktion
Bbasic 2019		explizit ereignisgesteuert dezentral	taktisch	global lokal	n Attribute m Relationen	
BBB 2019	BMW AG	explizit kontinuierlich dezentral	Relationen Intentionen	Konflikt sonstiges Ereignis	MCM	F1
			taktisch	global lokal	n Attribute m Relationen k Bewegungsbereiche	
Collaborative Maneuver Protocol (CMP)	Mercedes-Benz AG/DCAITI	implizit Dezentrale syn- chronisierte State-Machine	Relationen (Rollen)	Zustandsänderung	IDSMS	F2
			strategisch taktisch	global lokal	1 Session-Zustand	
Truck-Long-Control 2019	MAN Truck & Bus SE	implizit kontinuierlich dezentral	Intentionen	Konflikt	MCM	F2
			strategisch taktisch	global lokal	1 Plan-Trajektorie 0-1 Wunsch-Trajektorien	
Truck-Overtaking 2017/18	MAN Truck & Bus SE	explizit dezentral	Relationen (Rollen)	sonstiges Ereignis	IDSMS	F6
			strategisch taktisch	global lokal	1 Session-Zustand	
Traffic Distribution (ITDM)	Die Autobahn GmbH des Bundes	implizit zentral (Informati- onsquelle) dezentral (Abstim- mung)	Situationen	sonstiges Ereignis	ITDM	F4
			strategisch	global	n Verteilung-Optionen	

Die Kriterien, auf denen die Tabelle basiert, sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

- **Konzept:** Kurzbezeichnung des Konzepts.
- **Projektpartner:** Projektpartner, der dieses Konzept in IMAGinE eingebracht hat.
- **Charakteristik:** Übergreifende Merkmale des Konzepts zum Prozess des Verhandeln bei einer Kooperation (implizit und/oder explizit), zu seinem Ablauf (kontinuierlich und/oder ereignisgesteuert) sowie zu seiner Steuerung (zentral und/oder dezentral).
 - *explizit:* Eine explizite Kooperation findet mit Kooperationspartnern statt, die ihre Kooperationsbereitschaft ausdrücklich, d.h. eindeutig und unmissverständlich dem kooperationsbedürftigen Kooperationspartner zusagen, und Kooperationsbereitschaft nötigenfalls vor Kooperationsabschluss auch explizit widerrufen. Dies muss durch den Austausch von für den Empfänger eindeutigen Informationen geschehen, etwa durch die Kooperationsbereitschaft des Senders und den betroffenen Kooperationspartnern eindeutig zuzuordnende Signale. Auch eine Ableitung der Information aus mehreren Signalen ist dann möglich, wenn die Eindeutigkeit der Ableitung für alle Empfänger auch unter unterschiedlichen Bedingungen (z.B. Kartenverwendung) dauerhaft gewahrt bleibt. Eine Anfrage nach Kooperation ist dann explizit, wenn sie eindeutig bestimmte Empfänger bezeichnet, deren Kooperationsbereitschaft angefragt wird. Explizite Kooperation enthält typischerweise eine Abstimmungsphase und eine Durchführungsphase.
 - *implizit:* Bei einer impliziten Abstimmung findet zwischen den Kooperationspartnern ein Nachrichtenaustausch statt, aus dem die Kooperationspartner selbst nach eigenem Ermessen, etwa unter eigener Auswertung der Situation durch Anwendung bestimmter Regeln, in eigener Verantwortung auf die Kooperationsbereitschaft anderer Partner schließen können, ohne dass die Voraussetzungen der expliziten Kooperation gewährleistet sind. Jeder Teilnehmer berücksichtigt diese Information bei sich in seiner weiteren Planung und passt ggf. seine Absichten an, um ein übergreifend günstigeres Ergebnis zu erzielen. Erst aus den Reaktionen anderer Teilnehmer kann auf deren Eingehen, auf die eigene Planung geschlossen werden.
 - *kontinuierlich:* Mögliche Kooperationspartner senden zyklisch Nachrichten zur Unterstützung möglicher Kooperationen aus, auch wenn sie selbst gerade nicht eine Kooperation anfragen oder nicht bestimmte Kooperationen gewähren möchten.
 - *ereignisgesteuert:* Kooperationspartner senden Nachrichten zur Unterstützung oder Durchführung von Kooperationen nur bei Bedarf aus.
 - *zentral:* Eine ausgezeichnete, zentrale Instanz („Master“) entscheidet – zumindest in bestimmten Zeiträumen – über die Durchführung und Steuerung von Kooperationen. Andere Kooperationspartner liefern Informationen und Rückmeldungen.
 - *dezentral:* Kooperationen werden ohne ausgezeichnete, steuernde Instanz gleichberechtigt gestartet, durchgeführt und beendet („Peer-to-Peer“).

- **Planungsprinzip:** Elemente des Konzepts, anhand derer ein kooperatives Manöver geplant wird (Intentionen, Relationen und/oder Situationen) sowie entsprechende Planungsebene (strategisch, taktisch und/oder operativ).
- **Abstimmungsprinzip:** Konzept-eigener Auslöser für die Kooperation (Konflikt und/oder sonstiges Ereignis) sowie Vorgehensweise bei der Suche einer kooperativen Lösung – für andere Teilnehmer oder nur für sich selbst (global und/oder lokal).
- **Luftschnittstelle:** Von dem Konzept verwendete V2X-Nachricht (MCM, IDSM, ITDM und/oder andere) sowie ihr maßgeblicher Inhalt (Trajektorien, Session-Zustände, Verteilung-Optionen und/oder andere).
- **Fahrfunktion:** Mit dem Konzept prototypisch umgesetzte Fahrfunktion in IMAGinE.

Ergebnisse

Im Rahmen dieses APs wurde auch die Verifikation von GUA1 durchgeführt. Dabei wurden die Arbeitsergebnisse engmaschig durch die Partner in ihren jeweiligen Simulationsumgebungen sowie in den Fahrzeugen bezüglich der verschiedenen Gesichtspunkte der Kooperation überprüft. Die Ziele des Arbeitspaketes, die Konzepte zur kooperativen Manöverabstimmung zu beschreiben und die Ergebnisse der Konzeptverifikation sowohl aus dem gemeinsam beauftragten Konzept als auch den partnerspezifischen Manöverabstimmungskonzepten zu dokumentieren, wurden erreicht.

Mit der erstellten Software konnten sowohl in den Fahrzeugen als auch in den Simulatoren die Konzepte anhand der definierten Funktionen erfolgreich verifiziert und damit der Proof-of-concept abgeschlossen werden.

Die Partnerbeiträge zur Beschreibung der partnerspezifischen Manöverabstimmungskonzepte und deren Verifikation wurden im veröffentlichten D2.5 dokumentiert. Des Weiteren wird an dieser Stelle auf die partnerspezifischen Veröffentlichungen und Berichte der IMAGinE-Partner verwiesen.

3.2.7 Zielerreichung

In diesem Teilprojekt konnten die genannten konzeptionellen Ansätze mit dem in AP2.5 durchgeführten „Proof-of-Concept“ als Konzeptstudie erfolgreich verifiziert werden. Mit allen Konzepten konnten in Simulation und/oder im Fahrzeug erfolgreich Kooperationen anhand der verschiedenen Funktionen durchgeführt werden. Die Projektpartner haben aus ihren Simulationsergebnissen für die aus dem GUA1 verfügbare Implementierung und für die partnerspezifischen Algorithmen erfolgreich Anpassungen abgeleitet und das System in den folgenden Arbeitspaketen stetig weiterentwickelt.

3.3 TP3: Kooperative Technologien

Zielsetzung

Teilprojekt 3 hatte zum Ziel, notwendige Softwaremodule gemäß den Anforderungen aus TP1 und der Systemarchitektur aus TP2 zu spezifizieren und umzusetzen. Dies umfasst sowohl Algorithmen, die im Fahrzeug angewendet werden, als auch Entwicklungs- und Evaluierungs-Werkzeuge. Als Ergebnisse wurden erwartet: die Bereitstellung gemeinsamer Technologien resp. Software-Module, Detailspezifikationen von Modulen auf Signalebene, Implementierung dieser Softwaremodule sowie die Spezifikation und Umsetzung der zur Entwicklung notwendigen Simulationswerkzeuge. Mit Abschluss dieses Teilprojektes sollte die Software für kollektive Perzeption, für kooperative Manöverplanung und -abstimmung, für Kommunikation und Simulation, Hardware-Anforderungen für die Fahrzeugumsetzung sowie eine Bewertung der HMI-Konzepte aus Fahrersicht und einer Erweiterung der Anforderungen erstellt sein.

3.3.1 AP3.1: Kollektive Perzeption

Ziel von AP3.1 war das Versenden ausgewählter Informationen der fahrzeugeigenen Wahrnehmung um somit kollektive Perzeption und Umfeldwahrnehmung zu ermöglichen. Kernziel von AP3.1 war die Entwicklung eines im Projekt gemeinsam genutzten Umfeldmodells, das die Informationen aus den partnerspezifischen Umfeldmodellen mit den kommunizierten Informationen kombiniert. Dazu sollten V2X-Standardnachrichten in das IMAGinE-Umfeldmodell integriert werden. Abschließend sollten Anforderungen an neue bzw. erweiterte Nachrichteninhalte bestimmt werden.

Zur Implementierung durch einen gemeinsamen Unterauftrag (GUA2) wurde durch ein umfangreiches Lastenheft eine Vorgabe für ein Umfeldmodell spezifiziert. Die Anforderungen an das Umfeldmodell wurden dabei aus den Definitionen der Funktionen abgeleitet. Diese Umfeldrepräsentation besteht aus einem dynamischen Objektmodell. Außerdem enthält sie ein statisches Straßenmodell basierend auf einer Karte, auf dem alle Objekte verortet werden. Die Informationen der dynamischen Objekte aus den partnerspezifischen Umfeldmodellen werden mit den Informationen aus der Kommunikation fusioniert. Die Fusion führt dabei Assoziation und Tracking von Objekten und V2X-Messungen durch.

3.3.1.1 Einordnung in das IMAGinE-Framework

Über das Framework2Framework Gateway ist das Kooperative Umfeldmodell an die Partnersysteme angebunden, die ein eigenes Umfeldmodell umgesetzt haben. Die Nachrichten aus dem COM-Modul aus den relevanten V2X-Standardnachrichten sowie aus der kollektiven Perzeption fließen in das IMAGinE-Umfeldmodell mit ein. Die statischen Karteninformationen werden aus einer lokal gehaltenen Kartenbasis geladen und mit über Funk empfangenen ortsfesten Informationen angereichert. Die Objektlisten werden in Ringspeichern gehalten, einerseits als globale Objektliste, die die fusionierten Objekte mit Informationen aus der kollektiven Perzeption

enthält. Diese Objektliste ist Grundlage für die Entscheidungen der kooperativen Manöverplanung. Andererseits gibt es die lokalen Objektlisten, die für das Versenden von V2X-Nachrichten verwendet werden, um Filterkaskaden und -schleifen zu vermeiden.

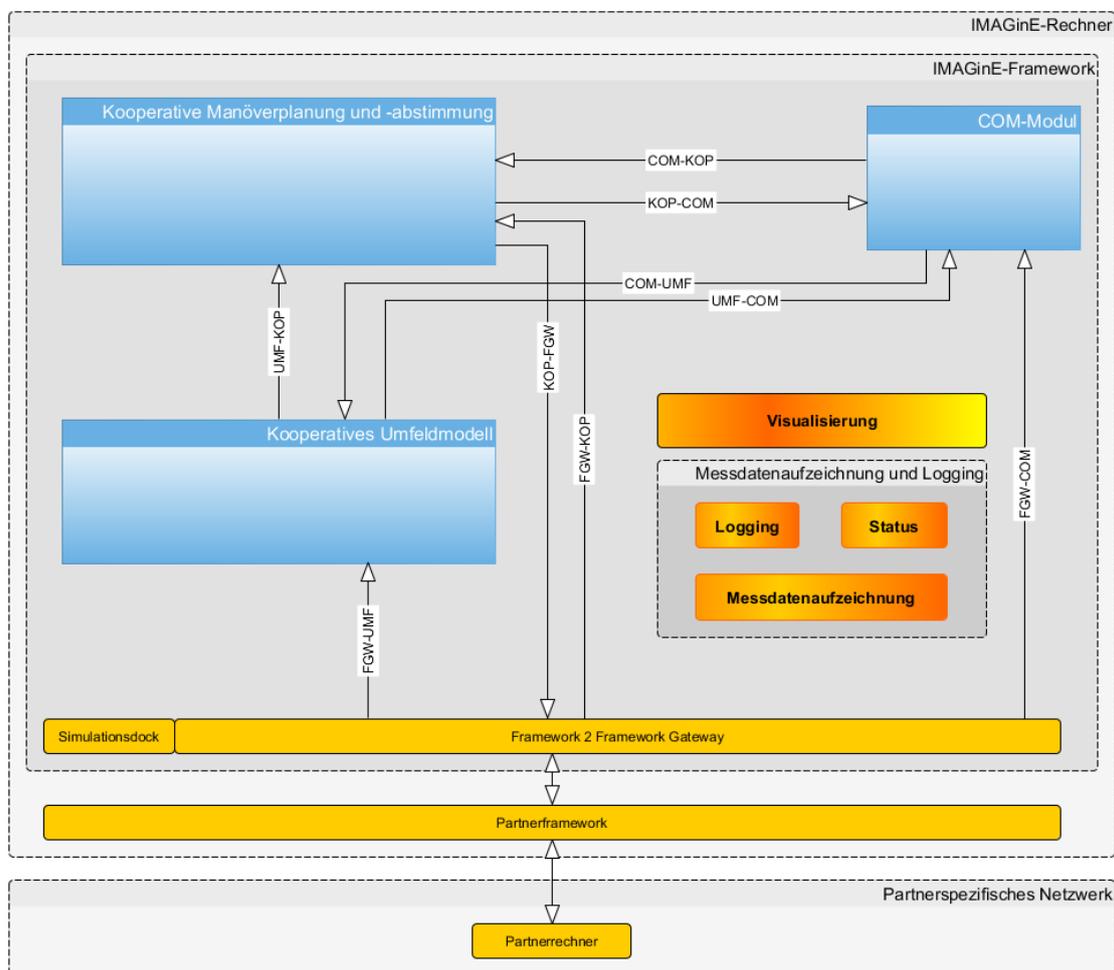


Abbildung 29: Systemarchitektur des IMAGinE-Systems

3.3.1.2 Wichtigste Arbeiten

Das IMAGinE-Umfeldmodell erfüllt zwei Aufgaben. Einerseits können auf Grund der Daten des Umfeldmodells die kooperativen Funktionen eine Entscheidungsfindung und -abstimmung durchführen. Andererseits dient das Umfeldmodell als Quelle der CPM-Nachrichten der kollektiven Perzeption. Das Umfeldmodell enthält Daten aus der lokalen Perzeption über das Framework2Framework-Gateway sowie über V2X ausgetauschte Informationen aus der kollektiven Perzeption. Die Daten aus den partnerspezifischen Frameworks bilden die Grundlage für die kollektive Perzeption. Zusätzlich kommen noch lokale Kartendaten hinzu.

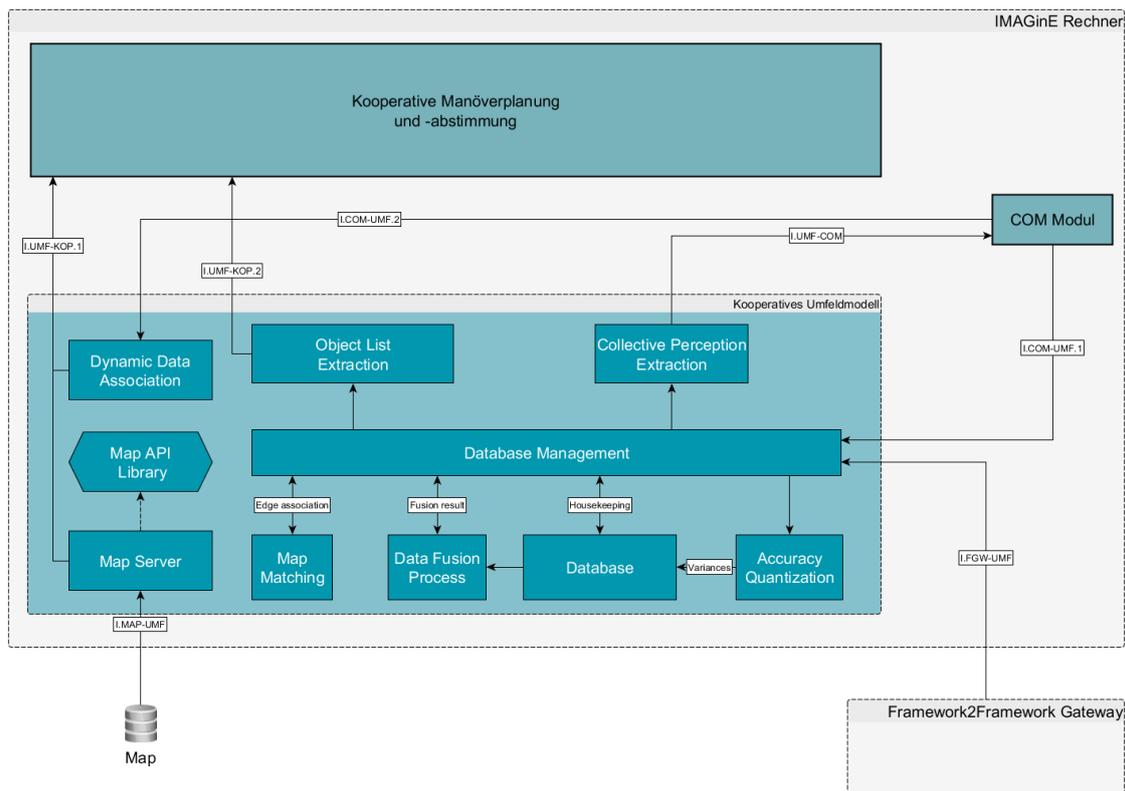


Abbildung 30: Grundlegende Komponenten des IMAGinE-Umfeldmodells

Das Umfeldmodell unterteilt sich in mehrere Komponenten.

Eingabekomponenten:

- **Datenbank:** Diese Komponente ist das zentrale Element des Umfeldmodells. Es hält die aktuelle globale Objektliste vor und aggregiert Onboard-Messungen und über V2X empfangene Messungen (Meldungen und Objekte, die über V2X empfangen werden, werden im Umfeldmodell auch als Messungen bezeichnet), lokale Objektlisten und Informationen über den Fahrzeugzustand. Diese Messdaten werden plausibilisiert und zur Aktualisierung der Tracks, d.h. der in Ringspeichern vorgehaltenen letzten Positionen eines Objekts, verwendet.
- **Database Management:** Diese Komponente ist für das Aktualisieren von Speichern für die Onboard- und über V2X empfangene Messungen, die lokalen Objektlisten und Informationen über den Fahrzeugzustand. Ebenso werden Tracks erstellt, wenn Messdaten keinem existierenden Track zugewiesen werden können und Tracks werden gelöscht, wenn sie über eine festgelegte Zeit keine aktualisierten Messdaten erhalten haben.
- **Map Server:** Diese Komponente extrahiert aus einer im IMAGinE-System oder im partnerspezifischen System hinterlegten Karte zur aktuellen Position passende Kartenabschnitte, die es in das IMAGinE-Kartenformat umwandelt und an die anderen Module kommuniziert.

- **Dynamische Daten-Assoziierung:** Diese Komponente empfängt über V2X dynamische Nachrichten (Schnittstelle COM-UMF.2), bspw. die Verkehrsdichte, und nutzt die Karten-API, um diese Informationen der IMAGinE-Karte zuzuordnen. Anschließend werden alle empfangenen Daten zu einer Liste zusammengefasst und über die Schnittstelle UMF-KOP.1 der Komponente KOP zur Verfügung gestellt.

Verarbeitungskomponenten:

- **Data Fusion Process:** In dieser Komponente werden Onboard-Messungen und über V2X empfangene Messungen verwendet, um die globale Objektliste zu aktualisieren.
- **Accuracy Quantization:** Diese Komponente bewertet die in der globalen Objektliste vorgehaltenen dynamischen Objekte. Diese Information dient der Entscheidung, welche Informationen über V2X geteilt werden.
- **Map Matching:** Diese Komponente ist dafür verantwortlich, Objekte aus der globalen Objektliste auf dem vom Map Server gelieferten Kartenausschnitt zu verorten.

Ausgabekomponenten:

- **Object List Extraction:** In dieser Komponente werden Informationen extrahiert, die über die Schnittstelle UMF-KOP.2 an das Modul KOP geschickt werden.
- **Collective Perception Extraction:** Diese Komponente ist für das Bereitstellen von Informationen, die in Form von CPM über V2X geteilt werden, verantwortlich. Diese umfassen ausdrücklich nur sensorisch erfasste Objekte – eine Weitergabe von über V2X empfangenen Objekten („multi-hop“) ist nicht geplant.
- **MAP API Library:** Dies ist keine Komponente in dem Sinne, dass es definierte Eingabe- und Ausgabeinterfaces gibt, sondern eine Bibliothek, die verschiedene Funktionen bereitstellt, um in den Modulen die IMAGinE-Karte effizient nutzen zu können. Beispielsweise ist es möglich, über die Schnittstelle UMF-KOP.1 zu den Koordinaten einer Position eine Straßenkante zu ermitteln. Diese Schnittstelle kann vom KOP-Modul genutzt werden. Intern im Umfeldmodell wird hierzu die Map Matching-Funktion aufgerufen.

3.3.1.3 Wichtigste Ergebnisse

Durch Abnahmetests der Projektpartner Bosch, Continental, Hessen Mobil/Autobahn GmbH, MAN und Opel in mehreren Versuchsträgern konnten die Arbeiten des Unterauftrags für das Kooperative Umfeldmodell geprüft werden. Mehrere Partner haben zudem mit der IMAGinE-Simulation das Umfeldmodell getestet.

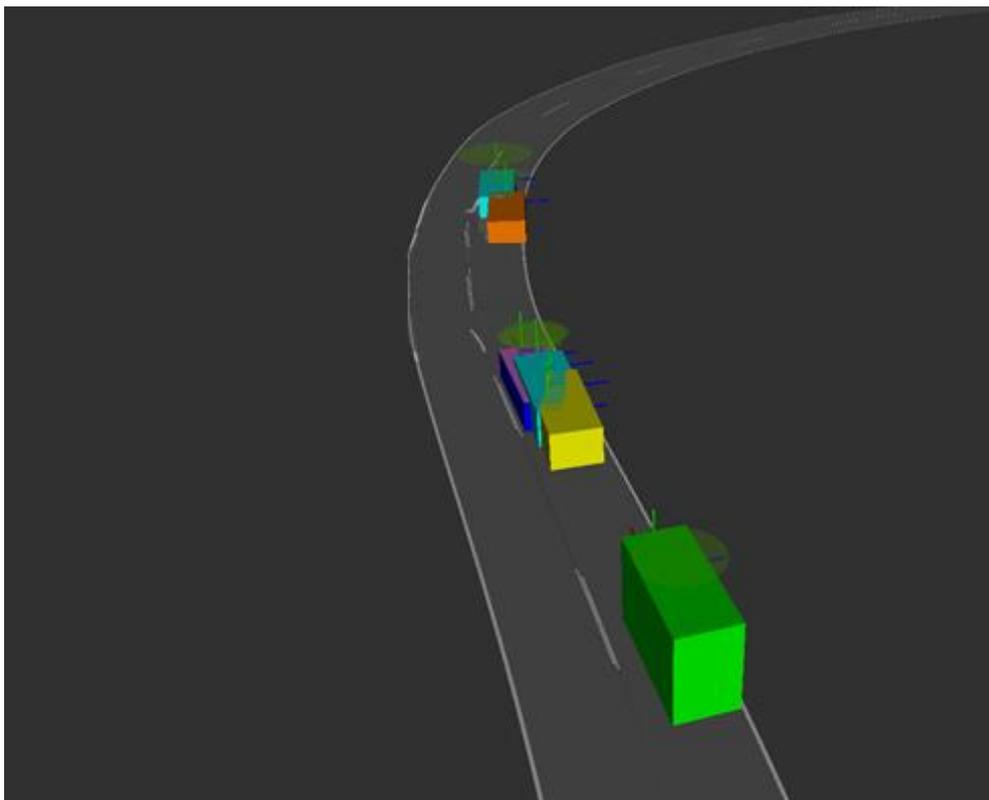


Abbildung 31: Kooperatives Umfeldmodell : Zwei kooperative Lkw folgen einem nicht-kooperativen Pkw

In der dargestellten Grafik sind zwei, mit kooperativer Technologie ausgestattete Lkw zu sehen, die einem nicht ausgestatteten Pkw folgen. Die Visualisierung zeigt die Objektrepräsentation im Umfeldmodell. In diesem und in anderen Szenarien konnte bei Fahrtests mit Versuchsträgern gezeigt werden, dass das Umfeldmodell nutzbare Ergebnisse liefert. Objekte wurden durch unterschiedliche Farben nach Objekttyp codiert. Das Umfeldmodell hält alle Objekte für einen einstellbaren Zeitraum vor und entfernt diese dann anschließend.

Im hier dargestellten Szenario wird der Pkw durch die Onboard-Sensorik vom darauffolgenden Lkw erkannt und per CPM an den hinteren Lkw gesendet. Die Visualisierung zeigt das Umfeldmodell des hinteren Lkw. Grün dargestellt ist das Ego-Fahrzeug, gelb die empfangene CAM vom vorderen IMAGinE-Lkw, blau das erkannte Objekt aus der Onboard-Sensorik, violett das lokal fusionierte Objekt, orange das empfangene Objekt aus der CPM und cyan die global fusionierten Objekte. Über den Objekten ist jeweils eine Fehlerellipse für die Position dargestellt, welche die Unsicherheit beschreibt. Der Pkw ist für den hinteren Lkw verdeckt, so dass er nicht mit der Onboard-Sensorik detektiert werden kann. Das gemeinsame Umfeldmodell ermöglicht dem zweiten Lkw jedoch, den Pkw in sein Umfeldmodell aufzunehmen.

Das Umfeldmodell wurde durch einen gemeinsamen Unterauftrag umgesetzt. Dabei wurden alle Module der Architektur sowie die Schnittstellen implementiert. Diese Arbeiten wurden

durch die Projektpartner begleitet und in Abnahmetests durch Simulation und Fahrten mit Versuchsträgern getestet.

Systembedingt traten bei den Versuchsfahrten kleinere Schwierigkeiten auf. Die Fusion im Umfeldmodell ist stark abhängig von der Datenqualität, unter anderem der aus der kollektiven Perzeption. Eine Abweichung der Orientierung um ein Grad kann bei 200 Metern Entfernung bereits dazu führen, dass ein Objekt auf der falschen Spur verortet wird. Dieses Problem tritt nicht nur im Umfeldmodell auf, sondern ist generell bei ungenauen Eingangsdaten vorhanden. Ähnliches gilt bei ungenauen Objektdimensionen in den Eingangssignalen. Oftmals ist es durch Kamera-, Radar- oder Lidar-Sensoren nicht möglich, die Größe eines Objektes exakt zu bestimmen, da ein Objekt immer aus einer bestimmten Richtung detektiert wird. Daher muss oftmals die Größe heuristisch bestimmt werden. Wird ein Objekt deutlich zu groß gemessen, kann es passieren, dass bei der Objektfusion im Umfeldmodell zwei Objekte verschmelzen oder, bei deutlich zu kleinen Dimensionen, dass ein Objekt doppelt vorhanden ist. Objekte können auch verschmelzen, wenn bei den Eingangsdaten der Objekte die Referenzpunkte nicht korrekt gesetzt sind und z.B. zu nah an der Nachbarspur liegen. Außerdem können durch Rotation in der Eigenbewegung des Ego-Fahrzeugs sowie durch die Kurvenbewegung von anderen Objekten Effekte entstehen, bei denen Fahrzeuge in Kurven neben der Fahrbahn verortet werden. Viele dieser Probleme konnten durch geeignete Parametersetzung, z.B. der Timeout-Zeit für Objekttracks behoben werden.

Diese aufgetretenen Schwierigkeiten sind systembedingt nicht vermeidbar und treten typischerweise bei der Verarbeitung von Sensordaten auf. Die in der VHB genannten Ziele von AP3.1 wurden alle erreicht.

3.3.1.4 Ausblick

Das Bewegungsmodell ist ein entscheidendes Element des Umfeldmodells. Das gilt sowohl für das eigene Umfeldmodell im Ego-Fahrzeug als auch für Fahrzeuge, von denen über kollektive Perzeption Daten empfangen werden. Eine Standardisierung dieses Modells könnte die Fusionsqualität erhöhen. Eine weitere Schwierigkeit ist die Bewertung der Güte von Objektinformationen, sowohl aus der Sensorik als auch aus der kollektiven Perzeption. Eine einheitliche Bewertung der Objektgüte könnte ebenfalls das Fusionsergebnis verbessern.

3.3.2 AP3.2: Situationsadaptive Manöverplanung

Die Arbeiten in AP3.2 hatten die folgenden Ziele:

- Entwurf von Software zur Planung kooperativer Manöver
- Entwicklung von Software zur Abstimmung von Manövern, Spezifikation von Nachrichteninhalten

Im öffentlichen Straßenverkehr ist häufig zu beobachten, dass Verkehrsteilnehmer miteinander kooperieren. Beispielsweise gewährt ein Autofahrer einem anderen die Vorfahrt, indem er dies

durch eine Handbewegung signalisiert. Diese Art der Kooperation basiert üblicherweise auf einem von zwei Gründen. Entweder ist nicht eindeutig geregelt, wie sich die Verkehrsteilnehmer verhalten sollen, und sie vermeiden durch die Kooperation proaktiv kritische oder ineffiziente Situationen, oder die entsprechende Regelung für die Situation führt dazu, dass ein Verkehrsteilnehmer handlungsunfähig wird, solange sich kein anderer Verkehrsteilnehmer kooperativ verhält. Diese unpräzisen Regelungen stellen eine besondere Herausforderung für das automatisierte Fahren dar. Für das automatisierte Fahren ist es erforderlich, die Straßenverkehrsregeln in eine exakte algorithmische Beschreibung zu übersetzen. Da diese Regeln unterschiedlich interpretiert werden können, kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle automatisiert fahrenden Fahrzeuge sich gleich verhalten werden. Weiterhin wird es auf absehbare Zeit Fahrzeuge geben, die nicht automatisiert fahren. Um diesen Realitäten zu begegnen, wurde in IMAGinE ein Konzept entwickelt, das die Kooperation zwischen Fahrzeugen erlaubt. Dieses Konzept kann für die Koordination von Manövern zwischen beliebigen Fahrzeugen genutzt werden. Dabei wird kein bestimmter Automatisierungsgrad der Fahrzeuge vorausgesetzt. Das heißt, es erlaubt auch die Manöverkoordination zwischen automatisierten, teilautomatisierten und manuell geführten Fahrzeugen.

Das erarbeitete Konzept der situationsadaptiven Manöverplanung basiert auf folgenden Annahmen: Für die Manöverkoordination ist der Austausch von Nachrichten zwischen lokal benachbarten Fahrzeugen notwendig. Es wird davon ausgegangen, dass die genutzte Kommunikationstechnologie in der Lage ist, Nachrichten von einem Fahrzeug zu allen Fahrzeugen im Umkreis von mehreren hundert Metern per Funk zu übertragen. Das Konzept der Manöverkoordination basiert auf dem Austausch von Trajektorien. Dabei wird angenommen, dass die Trajektorien eine zeitliche Länge zwischen 1 und 30 Sekunden haben. Um erkennen zu können, wann eine Manöverkoordination notwendig ist, und zur Festlegung, welcher Verkehrsteilnehmer welche Rolle bei der Koordination einnimmt, wurden Vorfahrtsregeln berücksichtigt. Die Fahrzeuge haben ein unvollständiges Wissen der Umgebung, das auch mittels Kommunikation nicht vollständig hergestellt werden kann. Deshalb muss das Konzept so ausgelegt sein, dass jedes Fahrzeug, das an der Koordination beteiligt ist, seine eigenen Entscheidungen trifft und dabei nicht abhängig vom Koordinierungsprozess ist. Die Zukunft kann nicht präzise vorhergesagt werden, daher handelt es sich bei den ausgetauschten Trajektorien um Prädiktionen, die auf der Basis von Modellannahmen erstellt wurden. Trotz allem können unvorhergesehene Ereignisse auftreten, die diese Prädiktionen ungültig machen. Die Manöverkoordination erfolgt dezentral, das heißt, es gibt keine zentrale Instanz, die die kooperative Manöverabstimmung steuert.

Im Rahmen von AP3.2 entstand eine Spezifikation für die kooperative Manöverplanung und -abstimmung (KOP). Diese Inhalte waren die Basis für das GUA1-Lastenheft. Das Lastenheft war die Grundlage für die Implementierungsarbeiten des Unterauftragnehmers.

Architekturkonzept

Die Beschreibung des Architekturkonzeptes umfasste die Architektur von Manöverplanung und -abstimmung, eine Beschreibung der dafür geplanten Komponenten und die Definition der internen Schnittstellen. Das entwickelte Konzept für Manöverplanung und -abstimmung wurde detailliert in einem Deliverable von AP2.1 beschrieben. Es handelt sich um ein innovatives und mehrstufiges Konzept, das zwischen den Stufen operativ, taktisch und strategisch unterscheidet.

Die strategische Ebene bildet grob aufgelöst und funktionsunabhängig den Fahrweg bzw. Pfad eines Fahrzeugs über die nächsten Kilometer ab. Das heißt, dass zu einem gegebenen Ziel eine Route berechnet wird, mit der das Ziel am besten erreicht werden kann. Bei der Routenberechnung wird nicht nur das Straßennetz berücksichtigt, sondern auch aktuelle durchschnittliche Reisezeiten auf einzelnen Straßensegmenten, um die aktuell effektivste Route zu berechnen. In der strategischen Ebene wird, wenn nötig, auch schon festgelegt, auf welchem Fahrstreifen ein Fahrzeug fahren soll. So eine Fahrstreifenfestlegung ist zum Beispiel notwendig, damit sich ein Fahrzeug rechtzeitig vor einer Ampel auf die korrekte Fahrspur einordnet. Dies verhindert, dass sich z.B. ein Linksabbieger auf eine Fahrspur einordnet, auf der man nicht links abbiegen darf. Zur strategischen Ebene gehören auch Funktionen mit einem zeitlich langen Horizont, die Einfluss auf die Fahrstrategie nehmen.

Die taktische Planungsebene ist dafür zuständig, Kurzzeitmanöver zu berechnen, die notwendig sind, um die Vorgaben der (fahr-)strategischen Planungsebene umzusetzen. Dabei wird die direkte Umgebung des Fahrzeugs berücksichtigt. Typische Kurzzeitmanöver sind Spurwechsel, Abbiegen, Anhalten, Geradeausfahrt, usw. Dabei müssen die aktuelle Topologie und alle relevanten Objekte in der Umgebung berücksichtigt werden. Diese Objekte können andere Fahrzeuge, Fußgänger, verloren gegangene Ladung, usw. sein. Das Ergebnis der taktischen Planungsebene ist eine grobe Trajektorie, die unter Berücksichtigung der aktuellen Situation versucht, die Vorgaben der strategischen Ebene umzusetzen. Diese Trajektorie muss kollisionsfrei aber nicht zwangsweise fahrdynamisch fahrbar sein.

Die operative Ebene ist die detaillierteste Stufe der Planung und dafür zuständig, die Trajektorie der taktischen Ebene abzufahren. Das heißt, für einen Prädiktionshorizont von 2 Sekunden wird eine fahrdynamisch fahrbare Trajektorie geplant, aus der dann die Steuerbefehle für den Motor, die Lenkung und die Bremsen berechnet werden. Auf der operativen Ebene kann auch noch eine abschließende Plausibilisierung der Trajektorie stattfinden. Sollte sie kollisionsbehaftet sein, kann ein Alternativmanöver (z.B. Bremsen) durchgeführt werden.



Abbildung 32: Architektur der Manöverplanung und -abstimmung im Überblick

Für die taktische und operative Stufe wurde ein generisches Konzept entworfen, das beide Stufen durch Anpassung einiger weniger Modulparameter abbilden kann. So werden vier generische Module abgeleitet, zur Zielpunktgenerierung, Trajektorienberechnung, Funktionslogik und Kooperationslogik.

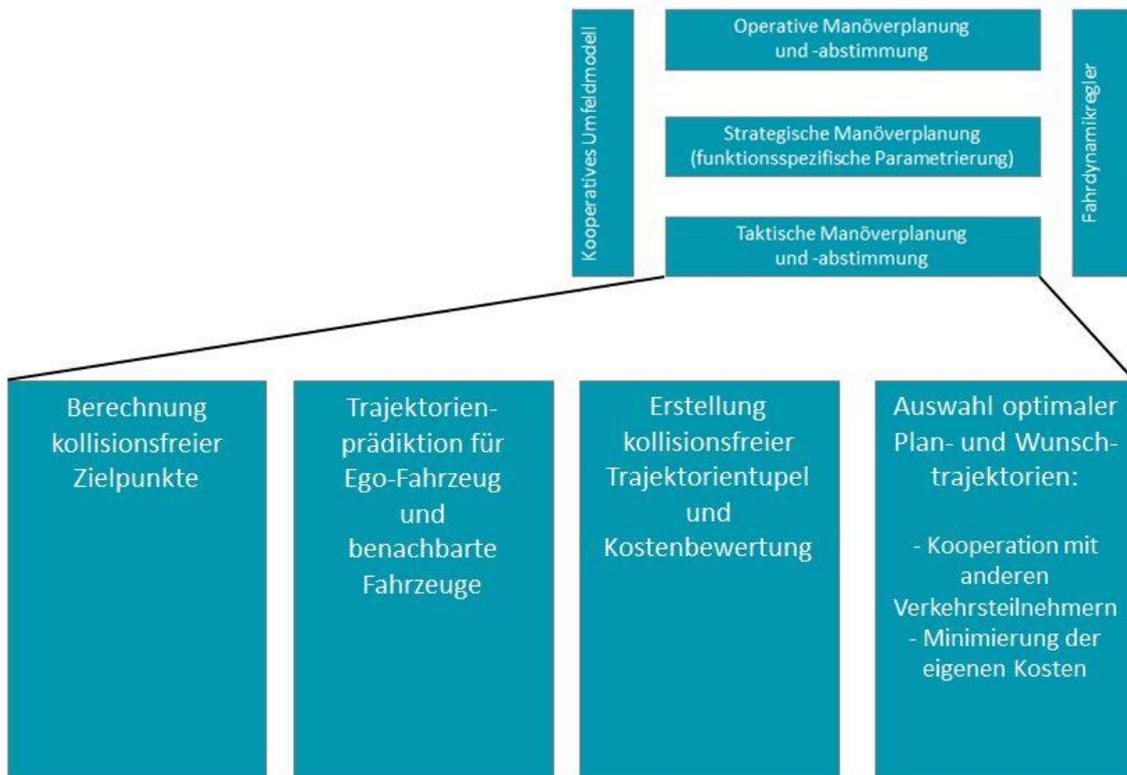


Abbildung 33: Module der taktischen bzw. operativen Manöverplanung und -abstimmung

Die Detailspezifikation für die kooperative Abstimmung wurde in diesem Arbeitspaket entwickelt. Die Architektur, wie in IMAGinE die Manöver zur Realisierung der sechs IMAGinE Funktionen plus Autopilot geplant und koordiniert werden sollen, folgt dem Aufbau eines deliberativen Kontrollparadigmas für ein Fahrzeug, gekennzeichnet durch die Aufteilung in Sensierung (Sense), Planung (Plan) und Ausführung (Act).

Die folgenden Module bilden die Architektur. Sie sind als Überblick in Abbildung 34: Module der Architektur illustriert.

Manöverplanung

Zur Manöverplanung werden folgende Modulgruppen benötigt: die Zielpunktgenerierung, die Trajektorienberechnung, die Funktionslogik und die Kooperationslogik.

Die Zielpunktgenerierung berechnet sichere Zielpunkte durch die Bestimmung aller technisch möglichen Zielpunkte zu einem Zeitpunkt. Diese Zielpunkte werden nach Kollisionsfreiheit mit statischen Objekten und der Straßengeometrie überprüft. Zudem soll hiermit sichergestellt werden, dass die Regeln der Kooperationslogik in allen Fällen zu mit der StVO kompatiblen Funktionseingriffen führen.

Die Trajektorienberechnung berechnet Trajektorien für ein gegebenes dynamisches Objekt. Dabei werden Trajektorien von einem Referenzpunkt des dynamischen Objektes zu allen dazu gegebenen Zielpunkten berechnet. Das Ergebnis der Trajektorienberechnung ist eine Menge von fahrbaren Trajektorien für das gegebene Objekt, die kollisionsfrei mit statischen Objekten sind und nicht den erlaubten Bewegungsraum verlassen.

Funktionslogik

Die Funktionslogik hat die Aufgabe, aus den berechneten Trajektorienscharen Tupel von kollisionsfreien Trajektorien zu bilden. Aus dem Fahrverhalten beziehungsweise den aktuellen Bewegungsdaten werden die wahrscheinlichsten Trajektorien extrapoliert und in der Schar der Trajektorien besonders gekennzeichnet. Zusätzlich findet hier auch die funktionspezifische Bewertung der Tupel statt.

Die Kooperationslogik schließlich ist dafür zuständig, aus der Menge aller sinnvollen Trajektorien die beste Plantrajektorie und optional die beste Bedarfstrajektorie für das eigene Fahrzeug zu wählen. Dabei werden die Bedarfe fremder Fahrzeuge berücksichtigt. Vor einer Bedarfserfüllung muss dabei für taktische Trajektorien und nicht-automatisierter Fahrt zusätzlich noch die Bestätigung des Fahrers zur Gewährung von Kooperationsbedarfen eingeholt werden.

Strategische Pfadprädiktion

Dieses Modul liefert Routen-Informationen an die Funktionen, die eine Grundlage für die taktische Manöverplanung bilden.

Arbitrierer

Der Arbitrierer hat die Aufgabe zu entscheiden, welche der sechs IMAGinE-Funktionen aktiv sein soll.

Funktionsmodule

Die Funktionsmodule wurden für jede IMAGinE-Funktion umgesetzt. Es handelt sich dabei jeweils um einen Zustandsautomaten, eine Situationsanalyse, ein Modul zum Triggern der taktischen Trajektorienplanung, einen taktischen Trajektorienbewerter, die Steuerung für die operative Trajektorienplanung, einen operativen Trajektorienbewerter, die funktionspezifische MMI-Ansteuerung sowie weitere funktionspezifische Module.

Der Zustandsautomat steuert den Ablauf einer Funktion und umfasst in der einfachsten Form die Zustände DISABLED, IDLE, SHADOWED und ACTIVE.

Die Situationsanalyse soll anhand von bestimmten Szenarienmerkmalen dem zugehörigen Zustandsautomaten signalisieren, dass die Funktion gestartet werden soll.

Das Modul zum Triggern der Taktischen Trajektorienplanung erlaubt es der Funktion, die taktische Manöverplanung zu beeinflussen.

Der taktische Trajektorienbewerter bildet die funktionspezifische Kostenfunktion ab, die die kollisionsfreien taktischen Plan- und Bedarfstrajektorien bewertet, die es als Tupel von den Modulen der Kostenfunktion bekommt.

Die Steuerung der operativen Manöverplanung übernimmt die von den Funktionen mit Hilfe der generischen Planung ermittelte taktische Plan- und Bedarfstrajektorie und leitet sie an die operative Planung weiter.

Die Kostenfunktion des Trajektorienbewerter schließlich bewertet das gesamte Trajektorientupel und kann je nach Bedarf so ausgestaltet sein, dass sie die Komfortpräferenzen der Insassen, die Dynamik des eigenen Fahrzeugs, den Treibstoffverbrauch, die Sicherheit, die von der entsprechenden Trajektorie erwartet wird, und vieles mehr berücksichtigt.

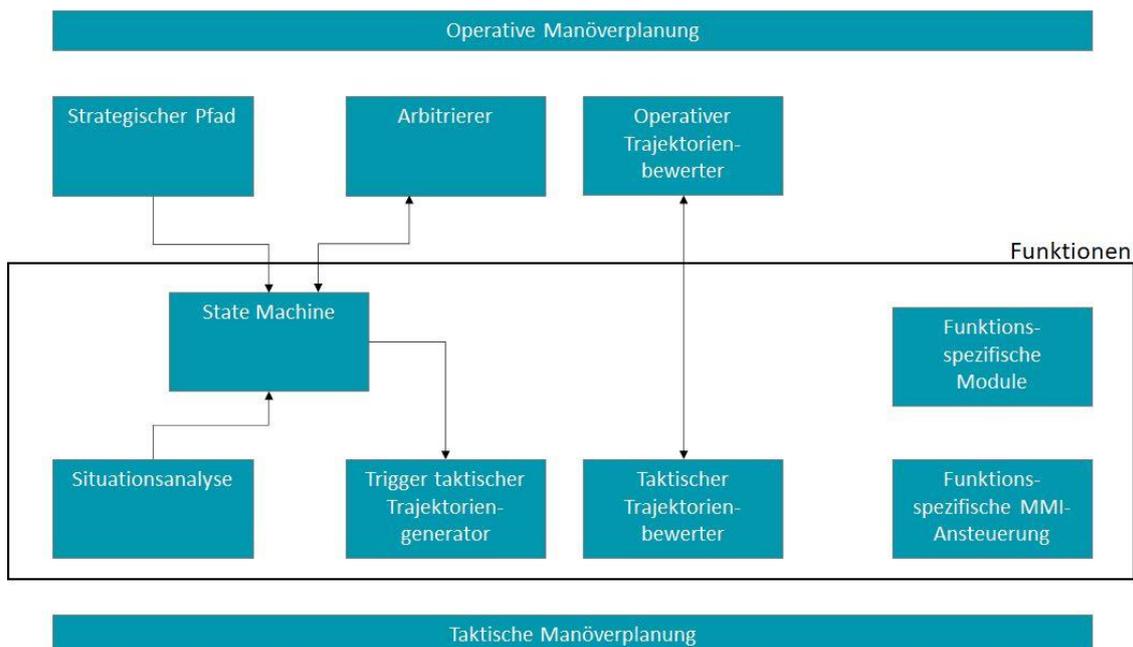


Abbildung 34: Module der Architektur

Die Details der Architektur und der enthaltenen Module wurden in einem umfangreichen Dokument festgehalten, das den Partnern zur weiteren Verwertung zur Verfügung steht.

Zusätzlich zu dem allgemein entwickelten Konzept, wurden die bei AP2.5 gelisteten alternativen KOP-Ansätze erarbeitet.

3.3.3 AP3.3: Kommunikation

Ziel des Arbeitspaketes AP3.3 war die Spezifikation und Realisierung der Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und dem Strategischen Support Server. Im Einzelnen umfasste dies:

- Feinspezifikation der Nachrichtenformate (unter anderen für kollektive Perzeption und kooperative Abstimmung) auf Basis der Ergebnisse des Teilprojekts 2: Kooperative Funktionen und Systemarchitektur.
- Bereitstellung von Kommunikationsmodulen (Kommunikationsstack) für de- und encoding, Meldungsmanagement und Kanalselektion
- Untersuchung von Kanalressourcen und Leistungsfähigkeit der Kommunikation sowie Bestimmung von Optimierungspotenzialen
- Bereitstellung einer geeigneten Basisstruktur für den Strategischen Support-Server

Die Bearbeitung der Ziele wurde auf die folgenden vier Unterarbeitspakete aufgeteilt:

- UAP 3.3.1 Feinspezifikation
- UAP 3.3.2 Kommunikationsmodul

- UAP 3.3.3 Experimentelle Optimierung
- UAP 3.3.4 Strategischer Support

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben den Ablauf der Bearbeitung sowie die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Die detaillierten Ergebnisse des AP3.3 wurden in einem internen (nicht veröffentlichten) Deliverable festgehalten.

3.3.3.1 Feinspezifikation

Die Feinspezifikation detailliert die im Rahmen von IMAGinE verwendeten, zwischen den Kommunikationspartnern ausgetauschten Nachrichten. Dazu werden die so genannten *IMAGinE Facilities* beschrieben, die die notwendigen Mechanismen zum Generieren und Empfangen von V2X-Nachrichten darstellen. Die Feinspezifikation verfolgte den Grundsatz, bereits standardisierte Botschaften des ETSI ITS-G5 Kommunikationssystems zu verwenden. Wenn existierende V2X-Nachrichten ungeeignet für die IMAGinE Anforderungen waren, wurden neue Nachrichtentypen entworfen und verwendet.

Folgende existierende V2X-Services wurden bei der Feinspezifikation für die Nutzung in IMAGinE identifiziert und beschrieben:

- Cooperative Awareness (CA) Service: Informationen des Senders u.a. zu seiner Position, Geschwindigkeit und Fahrrichtung.
- Collective Perception (CP) Service (in Standardisierung): Austausch von mittels Bordsensoren detektierten Objekten zwischen Verkehrsteilnehmern.

Folgende bisher nicht existierende V2X-Services wurden identifiziert und neu definiert:

- [Maneuver Coordination \(MC\) Service](#): Austausch und Verhandlung von künftigen Trajektorien zwischen benachbarten Fahrzeugen.
- [IMAGinE Driving Strategy \(IDS\) Service](#): Synchronisierung von Zustandsautomaten für die strategische Manöverabstimmung.
- [IMAGinE Traffic Distribution \(ITD\) Service](#): Abstimmung zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur um eine Verkehrsverteilung an einem Knotenpunkt zu realisieren.

Zuletzt wurden auch einige V2X-Services untersucht, für die während der Projektlaufzeit festgestellt wurde, dass sie für die Umsetzung der IMAGinE-Funktionen nicht erforderlich waren:

- Decentralized Environmental Notification (DEN) Service: sicherheitsrelevante Objekte/Ereignisse wie liegengebliebene Fahrzeuge (Stationary Vehicle Ahead, SVA), Notbremsungen (Emergency Electronic Brake Light, EEBL), Einsatzfahrzeugwarnung (Approaching Emergency Vehicle, AEV), usw.
- In-Vehicle Information (IVI) Service: Übertragung von Verkehrszeichen mit Gültigkeitsbereich von der Straßeninfrastruktur ins Fahrzeug.

- **IMAGinE Debug (ID) Service:** Übertragung von Informationen aus Systemkomponenten für die Entwicklung von Komponenten und während der Erprobung unter realen Testbedingungen.

Für alle benutzten Nachrichtenformate wurden die Schnittstellen zwischen V2X-Nachrichtenspezifikation (ASN.1 Definition) und IMAGinE-internem Nachrichtenformat (ROS Message) definiert. Dies ermöglicht eine eindeutige Umrechnung zwischen IMAGinE-Nachrichten und V2X-Nachrichten und umgekehrt. In Analogie zu existierenden ETSI-Standards, wurden die neu definierten V2X-Nachrichtenformaten (MCM, IDSM und ITDM) im ASN.1-Format beschrieben und im IMAGinE-Kommunikationsmodul umgesetzt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Nachrichtengröße möglichst gering bleibt, um die erzeugte Kanallast auf dem ITS-G5 Kommunikationskanal im Rahmen zu halten.

Außerdem wurden die Nachrichtenformate und -protokolle des Maneuver Coordination Service, zur Standardisierung bei ETSI vorgeschlagen. Zudem wurde die ETSI-Standardisierung der Collective Perception Message verfolgt, und es wurden Beiträge aus IMAGinE eingebracht, sodass die standardisierte Collective Perception Message die IMAGinE-Anforderungen erfüllt (siehe Zusammenarbeit mit anderen Stellen für weitere Informationen).

3.3.3.2 Kommunikationsmodul

Das Kommunikationsmodul dient als Schnittstelle zwischen dem IMAGinE-System und der Kommunikationshardware. Die Daten für die zu versendenden Nachrichten werden aus den IMAGinE-Messages gelesen. Empfangene Nachrichten von anderen Partnern werden wieder als IMAGinE-Messages zurück in das IMAGinE-System geschrieben und können dann von anderen Komponenten weiterverarbeitet werden. Die in IMAGinE eingesetzten Nachrichtentypen sind CAM, CPM, MCM, IDSM und ITDM. Zur Übertragung an die Kommunikationshardware wird das von ihr bereitgestellte SDK (Software Development Kit) zur Anbindung verwendet. Die bereits in der Kommunikationshardware implementierten Nachrichtentypen CAM und CPM werden darüber zur Kodierung und zum Versenden an die Kommunikationshardware verwendet. Die übrigen, noch nicht in der Kommunikationshardware implementierten Nachrichtentypen MCM, IDSM und ITDM, werden dagegen direkt im Kommunikationsmodul im ASN.1-Format kodiert/dekodiert und dann als generische Nachricht an das Kommunikationsmodul zum Versand geschickt bzw. von anderen Partnern empfangen.

3.3.3.2.1 waveBEE

Die in IMAGinE eingesetzte Kommunikationshardware ist die waveBEE Plus. Sie übernimmt den dynamischen Verbindungsaufbau zwischen den verfügbaren Kommunikationspartnern und tauscht die versendeten V2X-Nachrichten zwischen ihnen aus. Jeder Kommunikationspartner verbindet sich mit seiner Kommunikationshardware, übergibt zu versendende Nachrichten an die waveBEE und übernimmt angekommene Nachrichten anderer Kommunikationspartner, die dann von ihm weiterverarbeitet werden können. Um diese Übertragungen zu ermöglichen, wird die von dem waveBEE SDK zur Verfügung gestellte C-API verwendet. Hierüber lassen sich die

Kommunikation zwischen Partnersystem und waveBEE programmiertechnisch steuern und die Nachrichten an die waveBEE zur Versendung übergeben bzw. angekommene Nachrichten in Empfang nehmen.

In der waveBEE selbst sind verschiedene, von ETSI standardisierte V2X-Nachrichtentypen standardkonform implementiert. Im IMAGinE-Projekt wurde die CAM verwendet und eine IMAGinE-eigene Weiterentwicklung des derzeitigen CPM-Standards implementiert. Bei diesen Nachrichten ist bereits die gesamte ASN.1-Kodierung, Verpackung und Versand/Empfang nach dem jeweiligen ETSI-Standard als Dienst in der waveBEE implementiert und über das SDK verwendbar. Daneben wird noch die Möglichkeit angeboten, generische Nachrichten zu versenden, um noch nicht standardisierte und in der waveBEE direkt implementierte V2X-Nachrichtentypen zu übertragen. In beiden Fällen übernimmt die waveBEE automatisch das Versenden und Empfangen an die verfügbaren Kommunikationspartner.



Abbildung 35: In IMAGinE eingesetzte Kommunikationshardware waveBEE

3.3.3.2.2 Geoserver

In IMAGinE wurde ein hybrider Ansatz für die Kommunikation entwickelt und getestet. Die IMAGinE-Fahrzeugarchitektur sieht sowohl die Kommunikation zwischen Fahrzeugen über Mobilfunk und ITS-G5 sowie die Anbindung des Strategischen Support Servers über diese Technologien vor. Beim Kommunikationsmodul waveBEE wurde der integrierte V2X-Stack um eine Komponente erweitert, die es ermöglicht, die generierten Datenpakete nicht nur über die Funkchnittstelle (ITS-G5) zu senden, sondern auch den Versand der Nachrichten über ein Mobilfunknetz unter Verwendung des Geoservers zu ermöglichen. Dadurch können die Nachrichten nicht nur an Fahrzeuge in unmittelbarer Nachbarschaft übermittelt werden, sondern ebenfalls an IMAGinE-Systeme, die über das Internet erreichbar sind. Um die Geoserver-Funktionalität nutzen zu können, ist es erforderlich, bestimmte Schnittstellen zu nutzen. Hierfür wurde ein SDK entwickelt und außerhalb der Integrationsworkshops getestet.

Die geografische Reichweite ist bei gegebener Netzwerkabdeckung im Mobilfunk prinzipiell unbeschränkt. Allerdings ist ein echter Rundfunk (z.B. Cell Broadcast), wie bei ITS-G5, in den Mobilfunknetzen aktuell nicht implementiert. Das hat zur Folge, dass mit den heutigen Mobilfunknetzen keine Nachrichten positionsabhängig, also ortsbezogen, verteilt werden können. Abhilfe schafft hier eine Geocast-Funktionalität, die auf einem speziellen Server, dem Geocast-Server, bereitgestellt wird.

Die Nutzung eines Geocast-Servers ist notwendig, um die Nachrichten, die in IMAGinE genutzt werden (CAM, DENM, CPM, MCM), gezielt im entsprechenden Verbreitungsgebiet zuzustellen. Der Geocast-Server soll

- Nachrichten in einem bestimmten geografischen Gebiet verteilen
- eine flexible Spezifikation des Gebietes (Kacheln, Polygone, Kartenobjekte) unterstützen
- eine serverbasierte Aggregation der Nachrichten erlauben
- skalierbar sein, um viele Fahrzeuge unterstützen zu können
- Privacy- und Security-Anforderungen berücksichtigen
- wenig zusätzliche Daten (Overhead) erzeugen

Weiterhin ist wichtig, dass die Geocast-Funktionalität eine geringe Latenz für die Datenübertragung aufweist und eine hohe Zuverlässigkeit bietet. Zusätzlich ist man bestrebt, die Datenrate niedrig zu halten, um Kommunikationskosten zu sparen. Die folgende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Nachrichtenfluss mit einem klassischen Server im Backend. Die Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und dem Geocast-Server basiert auf UDP. Im IMAGinE-Szenario wird zusätzlich ein externer Server, der Strategische Support Server (SUPS), genutzt. Dieser Server, der von einer Straßenbehörde (Die Autobahn GmbH des Bundes) bereitgestellt wird, ist prinzipiell geeignet um auch Nachrichten über den Geocast-Server verteilen zu können.

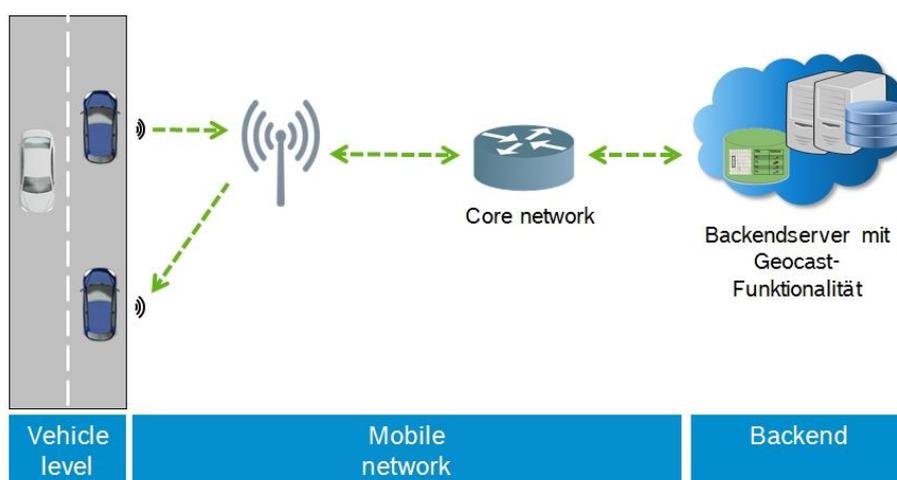


Abbildung 36: Kommunikation zwischen Geoserver und Fahrzeugen

Der Geocast-Server funktioniert grundsätzlich nach dem in der folgenden Abbildung dargestellten Prinzip. Fahrzeuge melden sich beim Geocast-Server mit ihrer Position/Kachel. Der Server, der die Kacheln kennt, speichert die Verbindungsdaten und die aktuelle Kachel, in der sich das Fahrzeug befindet. Soll eine V2X-Nachricht verteilt werden, wird beim Geocast-Server das Verbreitungsgebiet der Nachricht und die Gültigkeitsdauer ermittelt. Nun werden mit Hilfe des Verbreitungsgebietes alle relevanten Kacheln berechnet, die benachrichtigt werden sollen. Anhand der gespeicherten Fahrzeugzuordnungen werden die V2X-Nachrichten den Fahrzeugen per Unicast geschickt. Nicht relevante Fahrzeuge werden nicht informiert. Um die V2X Nachrichten gezielt Fahrzeugen in bestimmten Regionen zustellen zu können, ist es erforderlich, deren Aufenthaltsbereiche zu erfassen. Hierfür wird die Weltkarte in virtuelle Kacheln eingeteilt. Die Kacheln werden direkt im Fahrzeug anhand der aktuellen GPS-Position berechnet, und zwar nach dem Navigation Data Standard (NDS). Dieser Ansatz ermöglicht es, Kachelgröße und Position in eine einzige, weltweit eindeutige Kachel-ID zu kodieren. Dies bringt zwei wesentliche Vorteile im Vergleich zu anderen Verfahren.

- Geringes Datenvolumen pro Nachricht, da nur die Kachel-ID anstelle von Geokoordinaten übertragen werden muss,
- Die Anzahl der zu übertragenden Nachrichten wird reduziert, da das Fahrzeug selbst die Kachel berechnet und dem Geocast-Server nur die Kachel-ID mitteilen muss. Es gibt keine Rückantwort des Servers.

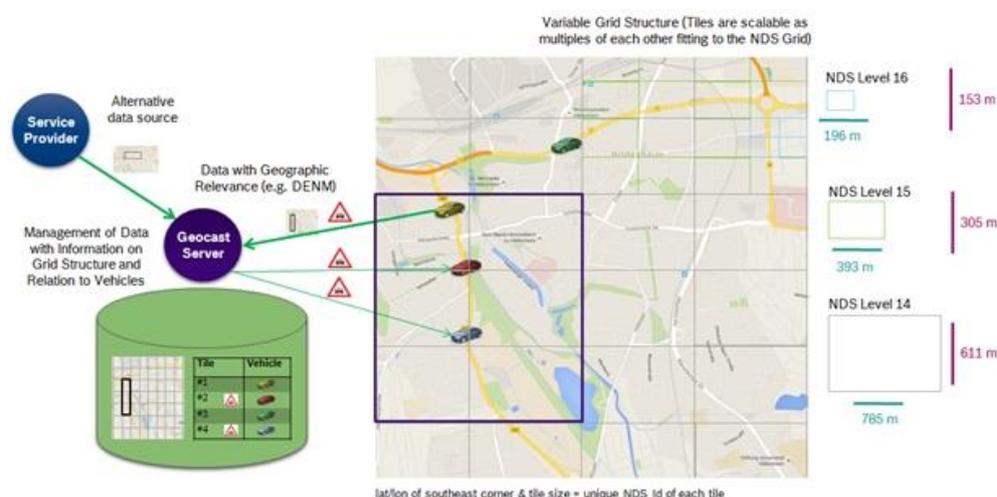


Abbildung 37: Funktionsprinzip des Geoservers

Damit Nachrichten über den Geoserver versendet werden können, muss im Kommunikationsmodul waveBEE der Geoserver Client implementiert sein. Der Client berechnet die aktuelle Aufenthaltskachel (NDS ID) und sendet diese dem Geoserver. Somit können dem Client die relevanten Nachrichten über den Geoserver zugestellt werden. Aktuell gibt es eine Konfigurationseinstellung in der waveBEE, die das Routing beeinflusst: Direktkommunikation ITS-G5, Mobilfunk über den Geoserver oder beide Kommunikationsarten parallel. Die Funktionsweise wurde gemeinsam von den Partnern Bosch und Nordsys implementiert und getestet.

3.3.3.3 Experimentelle Optimierung

Die neu entwickelten V2X-Nachrichten werden eine zusätzliche Last in den für die V2X-Kommunikation zur Verfügung stehenden Übertragungskanälen, sowohl via ITS-G5 als auch über Mobilfunk, erzeugen. Es galt daher zu klären, welchen Einfluss diese neuen Nachrichten auf die Kanallast haben werden und welchen Einfluss die physikalischen Eigenschaften der Übertragungsstrecke, wie z.B. Dämpfung und Kanalschwund auf den Ablauf der Manöverabstimmung haben können.

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des gemeinsamen Unterauftrags 4 (GUA4) durchgeführt.

Im Fokus der Untersuchung standen hauptsächlich die sogenannte Day-1-V2X Nachricht CAM, sowie neue, noch nicht final standardisierte Nachrichtenformate wie CPM und die innerhalb von IMAGinE neu eingeführten Nachrichtenformate MCM und IDSM. Bei der gemeinsamen Festlegung der Annahmen bezüglich Nachrichtengröße und Nachrichtenfrequenz konnten bereits Erkenntnisse aus den Versuchen mit den aufgebauten Versuchsträgern einfließen.

Die analytischen Betrachtungen innerhalb des GUA4 haben gezeigt, dass die Kanalkapazität eines einzelnen Kanals nur bei einer geringen Anzahl von Sendern ausreicht, um die vier betrachteten Nachrichtentypen ohne Probleme zu übertragen. Lediglich bei 25 Sendern in Kommunikationsreichweite wird der von ETSI A-DCC anvisierte Zielwert der Kanallast von 68% noch unterschritten, und 1200 Byte große MCM können noch im gleichen Kanal mit einer Frequenz von 10 Hz versendet werden.

Somit lässt sich zusammenfassend sagen, dass aufgrund der durchgeführten Analyse davon ausgegangen werden muss, dass mindestens ein zusätzlicher Kanal für einen sinnvollen Einsatz von CPM und MCM erforderlich sein wird.

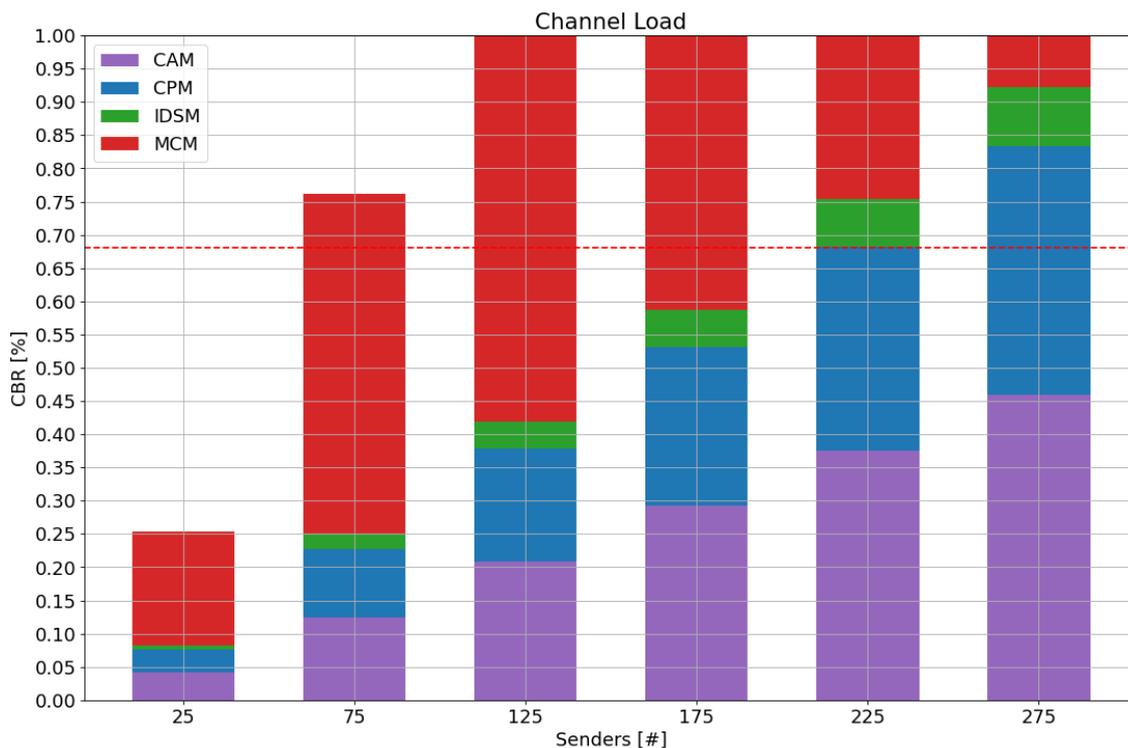


Abbildung 38: Betrachtung der Kanallast

Für die weitere Untersuchung wurde eine Simulationsumgebung basierend auf einer Kopplung des Verkehrssimulators SUMO ([Simulation of Urban MObility](#)) mit dem Netzwerksimulator-Framework OMNeT++ ([Objective Modular Network Testbed in C++](#)) erstellt. Die Kopplung der Simulatoren und die Erweiterung um die Fahrzeugkommunikation wurde mit Hilfe des Open-Source-Framework Veins ([Vehicles in Network Simulation](#)) und die Artery-Middleware durchgeführt. Die Simulation der Kommunikation wurde sowohl für ITS-G5 als auch Zellular V2X durchgeführt.

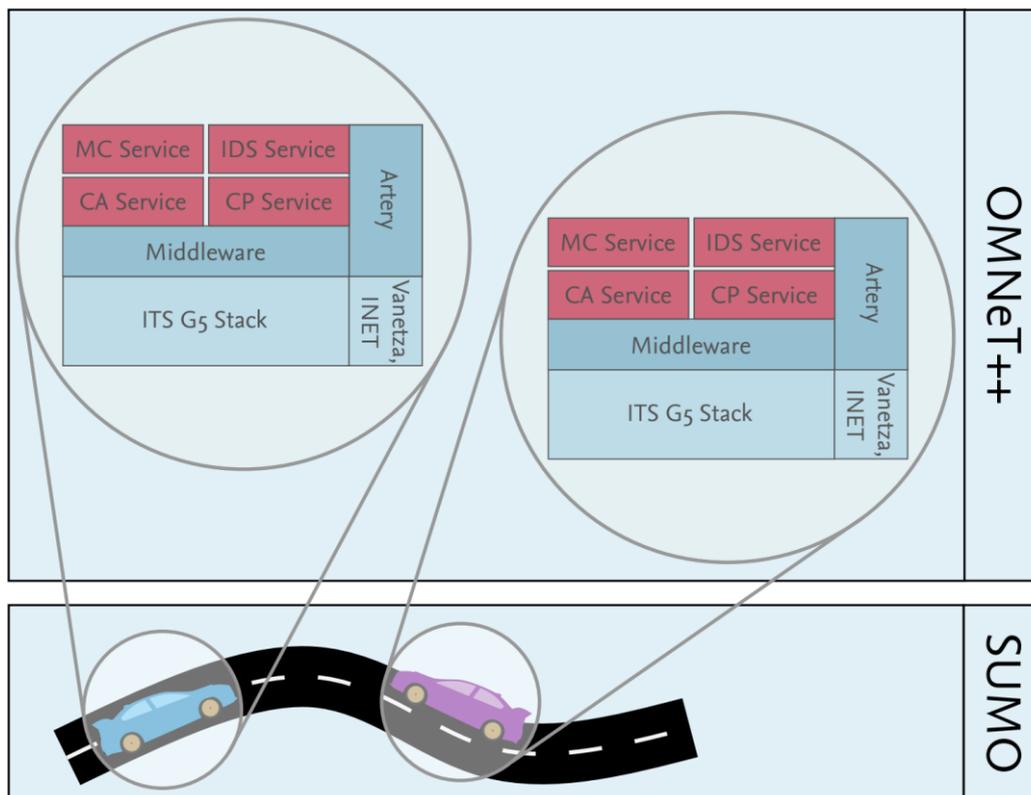


Abbildung 39: Simulationsumgebung

Untersucht wurden drei verschiedene Verkehrsszenarien, bei denen jeweils verschiedene Parameter wie Nachrichtengenerierungsintervall, Nachrichtengröße, Ausstattungsrate, etc. variiert wurden und die Nachrichtenübertragung in einem oder mehreren Kanälen simuliert wurde. Dazu wurde das jeweilige Straßennetz aus OpenStreetMap importiert und die Verkehrsflüsse in SUMO über Flows definiert.

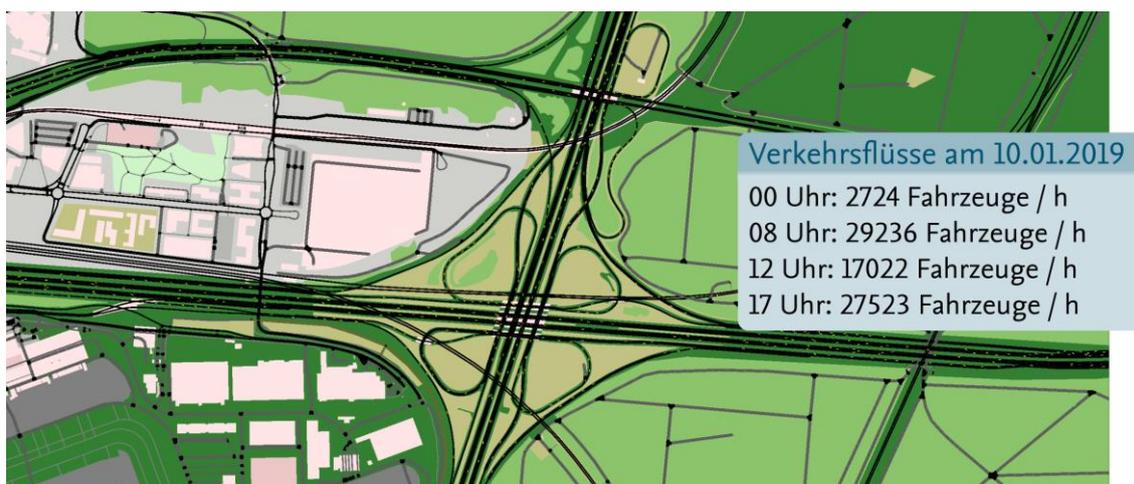


Abbildung 40: Szenario 1 – Frankfurter Kreuz

Die Simulation des Autobahnkreuzes Frankfurter Kreuz erlaubt grundsätzlich die Untersuchung der IMAGinE-Funktionen F1, F2, F4 und F6. Die Verkehrsflüsse wurden mit Daten der bereitgestellten Verkehrszählungen durch das Bundesamt für Straßenwesen (BASt) (<https://www.bast.de/>) angereichert.



Abbildung 41: Szenario 2 – Ko-PER-Kreuzung in Aschaffenburg

Das Szenario einer Kreuzung in Aschaffenburg erlaubt grundsätzlich die Untersuchung der IMAGinE-Funktion F5. Die betrachtete Kreuzung wurde bereits in einer früheren Forschungsinitiative Ko-FAS (<http://ko-fas.de/>) untersucht. Die daraus resultierenden Use Cases konnten für die Untersuchung der kooperativen Funktion F5 genutzt werden.

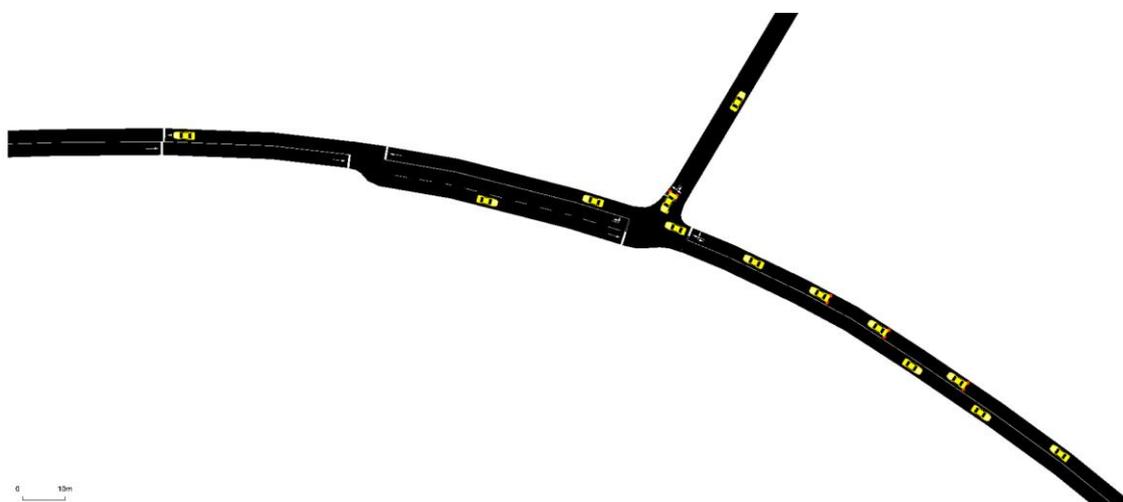


Abbildung 42: Szenario 3 – T-Kreuzung zweier Landstraßen

Das Szenario einer T-Kreuzung zweier Landstraßen eignet sich zur Untersuchung der IMAGinE-Funktion F3. Dieses sehr isolierte Szenario erlaubt die Untersuchung verschiedener Verkehrsflüsse, wie Stau (0,1 km/h), flüssigem (80 km/h) und schnellem (100 km/h) Verkehr sowie kurze Staus verursacht durch landwirtschaftlichen Verkehr.

Für die genannten Szenarien wurden jeweils die Metriken Zuverlässigkeit, Kanalauslastung, Kanalzugriffszeit, Manöverkoordinierungszeit und Informationsalter untersucht.

Um die Auslastung des Kommunikationskanals zu optimieren, wurden zwei Ansätze verfolgt: „Interval-Adjust“ verändert das Generierungsintervall abhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs (ähnlich, wie es bereits bei der CAM im ETSI Standard vorgesehen ist). „Power-Adjust“ verändert, ebenfalls geschwindigkeitsabhängig, die für die MCM verwendete Sendeleistung.

Insgesamt ließen sich mit der Interval-Adjust-Regel in fast allen Metriken und betrachteten Szenarien signifikante Verbesserungen bei der Kommunikation erzielen. Sie bietet sich als sehr einfach umsetzbare Methode an. Die Power-Adjust-Regel könnte aufgrund des besseren spezifischen Informationsalters dann sinnvoll sein, wenn häufige Updates wichtig sind. Der Einfluss der Regeln ist umso stärker, je geringer die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist. Allerdings ist hierbei auch zu beachten, dass eine verringerte Kommunikationsreichweite und damit eine geringere Manöverkoordinierungszeit in Szenarien mit geringeren Geschwindigkeiten die Folge sind.

Insbesondere für die Power-Adjust-Regel wäre es sinnvoll, eine übergeordnete Instanz zu haben, welche abhängig von der gegebenen Verkehrssituation, respektive dem Koordinierungsbedarf, die Sendeleistung entsprechend anpasst. So ist beispielsweise für die Funktion F5 („Kooperatives Linksabbiegen auf Landstraßen“) die Power-Adjust-Regel in der hier gewählten Parametrisierung kontraproduktiv, da genau für diese Situation die maximal mögliche Koordinierungszeit, nämlich beim Halten an der T-Kreuzung und Warten auf eine Abbiegegelegenheit, durch die an die Geschwindigkeit adaptierte Sendeleistung minimal würde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sowohl Netzwerk (Kommunikationskanal) als auch die Applikationsebene betrachtet werden müssen, um den Anforderungen der Manöverkoordination gerecht zu werden.

3.3.3.4 Strategischer Support

Ziel des strategischen Support Servers (SUPS) ist die Bereitstellung infrastrukturseitiger Informationen zur Optimierung der fahrzeugseitigen Funktionalitäten. Durch die Fusion von infrastrukturseitig und fahrzeugseitig ermittelten Daten soll der Wirkungsgrad der IMAGinE-Funktionen verbessert werden. Der SUPS ist ein Bestandteil der Funktion F4 „kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“. Er stellt die zentralseitige Komponente der F4 dar und hat die Aufgabe die optimale Verkehrsverteilung zu ermitteln und an die Fahrzeuge zu übertragen.

Der SUPS wurde von einem Unterauftragnehmer der Autobahn GmbH des Bundes implementiert. Abbildung 43 zeigt die Architektur des SUPS.

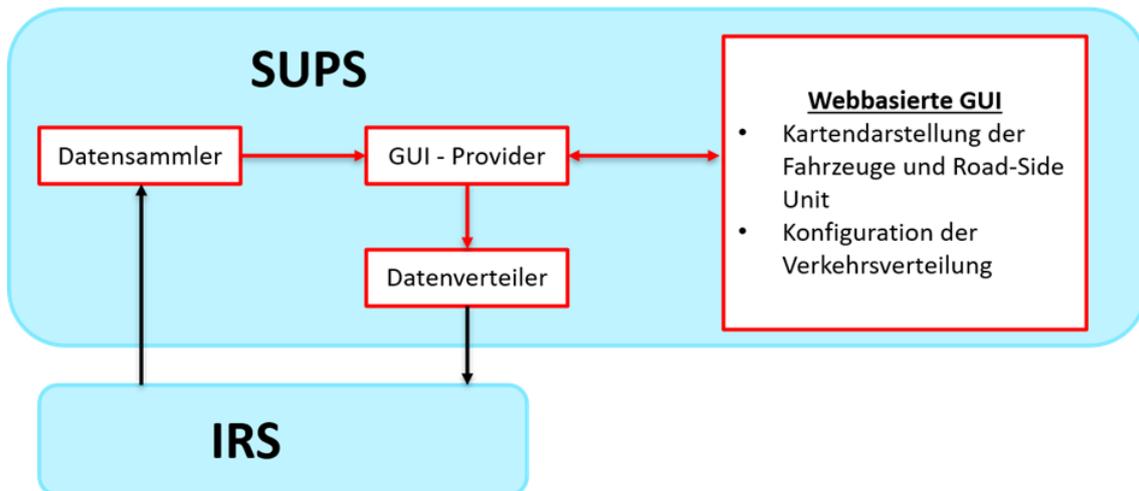


Abbildung 43: Architektur Support Server

Der SUPS besteht aus vier Modulen: Der Datensammler empfängt Informationen über die sich in Sendereichweite der IRS (ITS Roadside Station) befindlichen Fahrzeuge. Diese Informationen werden aufbereitet und weiter an den GUI-(Graphical User Interface)-Provider übermittelt.

Der GUI-Provider hat zwei Funktionen. Zum einen stellt er über einen Webserver eine Benutzeroberfläche – die webbasierte GUI – zur Verfügung. Diese Oberfläche kann über webfähige Clients aufgerufen werden und zeigt auf einer Karte die IRS und die vom Datensammler bereitgestellten Daten. Zum anderen stellt er die Informationen zur Verteilungsempfehlung dem Datenverteiler zur Verfügung.

Der Datenverteiler generiert aus den vom GUI-Provider empfangenen Daten eine Verteilungsempfehlung und gibt diese über die definierte Schnittstelle an die IRS weiter.

Die Datenübertragung zwischen SUPS, IRS und Fahrzeugen bei der Funktion F4 ist in Abbildung 44 dargestellt.

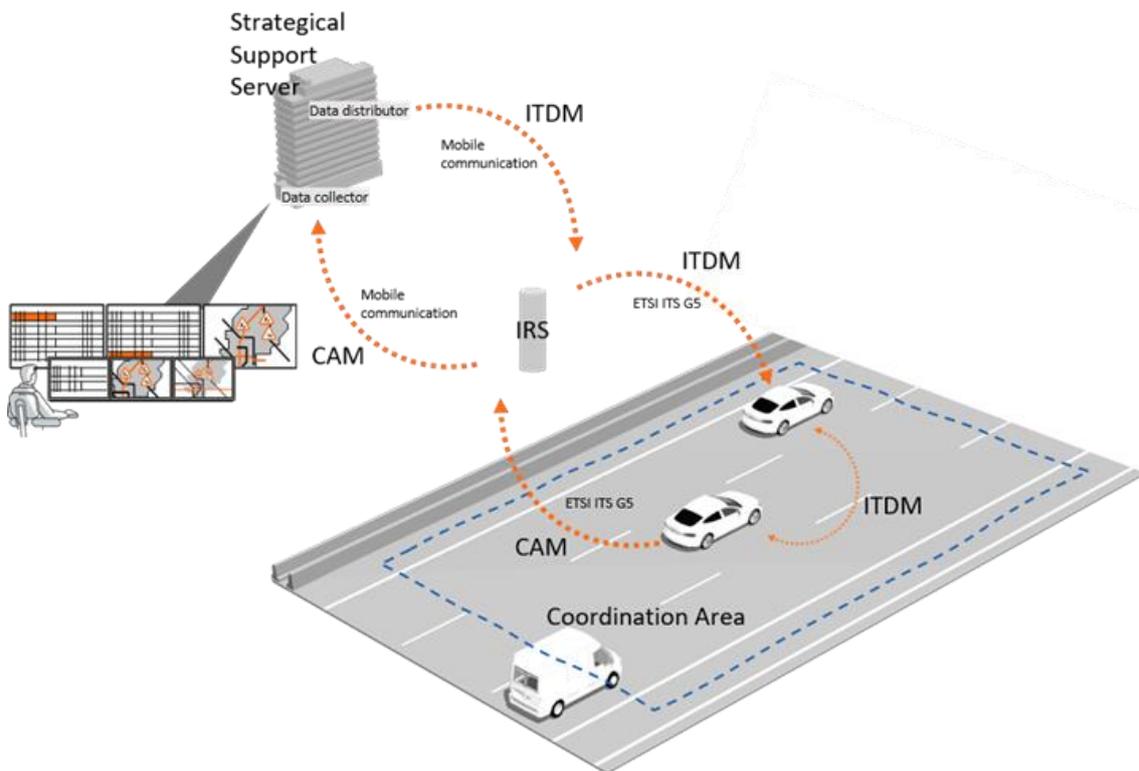


Abbildung 44: Datenübertragung Funktion F4

Die vom SUPS ermittelten Verteilungsempfehlungen werden per Mobilfunk an die lokalen IRS versendet. Die Versendung erfolgt zyklisch. Die lokalen IRS leiten daraufhin per ETSI ITS G5 die empfangenen Verteilungsempfehlungen an die Fahrzeuge weiter.

Im Abstimmungsbereich (Coordination Area) erfolgt der Kooperationsprozess. Hier erhalten die Fahrzeuge durch die IMAGinE Traffic Distribution Message (ITDM) Informationen über die bevorzugte Route der Fahrzeuge in ihrer Nähe und wählen nach Abgleich mit den eigenen Präferenzen ihre Route.

Die IRS erhalten per ETSI ITS G5 von den Intelligent Vehicle Stations (IVS) – den Kommunikationseinheiten der Fahrzeuge – eine Cooperative Awareness Message (CAM) mit Statusinformationen der Fahrzeuge zugesendet. Die IRS leitet per Mobilfunk die CAM an den Datensammler des SUPS weiter. Dadurch erhält der SUPS die Informationen über die Abfahrtsentscheidungen der Fahrzeuge.

3.3.4 AP3.4: Technologieorientierte Simulation

Ziel von AP3.4 war die Umsetzung geeigneter Simulationstools zur Entwicklung und zum Test der IMAGinE-Funktionen. Das AP startete bereits in einer frühen Projektphase im Juni 2017 und endete kurz nach dem Abschluss des gemeinsamen Unterauftrags zur kooperativen Manöverplanung. In diesem Zeitraum hatte sich das Arbeitspaket mit folgenden Arbeiten beschäftigt:

- Spezifikation und Implementierung projektbezogener Simulationstools

- Datenlieferung für die Erprobung des IMAGinE-Umfeldmodells inklusive kollektiver Perception
- Erprobung des Laufzeit- und Closed-Loop-Verhaltens der kooperativen Funktionen
- Untersuchung der Use Cases in unterschiedlichen Simulationsausprägungen

Im Rahmen des Projektes wurden unterschiedliche Aspekte der Manöverkoordination mit verschiedenen Simulationsansätzen und -umgebungen analysiert. Neben Verkehrsflusssimulation und Fahrsimulation am Fahrsimulator kam speziell für die Entwicklung der kooperativen Manöverplanung und -abstimmung die Fahrzeugsimulation zum Einsatz. Hierzu wurde parallel zu den Aktivitäten rund um die Ausarbeitung der Abstimmungskonzepte partnerübergreifend eine Simulationsarchitektur entworfen, die sowohl in einer Referenzumgebung umgesetzt wurde, aber auch die Basis für mehrere partnerspezifische Simulationsaufbauten lieferte. Nach Anbindung an das verwendete Referenzframework und Implementierung notwendiger Schnittstellen für die Gesamtsimulation wurden damit einzelne IMAGinE-Basiskomponenten entwickelt, die es dann in Kombination ermöglichten, das kooperative Gesamtsystem zu testen, bevor es mit einem angemessenen Reifegrad in die realen Fahrzeuge integriert werden konnte.

Die Anforderungen an die Simulationsumgebung wurden in enger Zusammenarbeit mit den abhängigen Arbeitspaketen AP2.3 Basis-Simulation und -Verifikation und AP5.3 Evaluation in der Simulation spezifiziert und durch die Simulationsexperten im Rahmen des AP3.4 umgesetzt. Die folgende Abbildung zeigt eine vereinfachte Version der IMAGinE-Simulationsarchitektur. Das IMAGinE-System mit den entsprechenden Modulen für die kooperative Manöverabstimmung ist über das IMAGinE-Framework, basierend auf dem Robot Operating System (ROS), an ein virtuelles Fahrzeug angebunden. Dieses verfügt über entsprechend detaillierte Modelle für die Fahrdynamik, Sensoren für die Umfeldwahrnehmung aber auch Mechanismen zur Umsetzung von dynamisch generierten Fahrhinweisen. Das virtuelle Fahrzeug ist über flexible Schnittstellen mit dem IMAGinE-Framework verbunden und tauscht hierüber die notwendigen Informationen aus, die je nach Anwendungsfall unterschiedlich detailliert sein können. Für eine kooperative Manöverabstimmung werden mehrere gleichwertige IMAGinE-Fahrzeuge benötigt, die mit entsprechenden Mechanismen für die V2X-Kommunikation untereinander Botschaften mit relevanten Inhalten austauschen. Die virtuellen Fahrzeuge bewegen sich in einer gemeinsamen Umwelt und werden über einen simulationsinternen Mechanismus synchronisiert. Sie können durch zusätzlichen Verkehr ohne kooperatives System beeinflusst werden. In Verbindung mit einer Testautomatisierung kann die Gesamtsimulation von zentraler Stelle aus gesteuert werden, um somit entsprechend eine größere Anzahl von Simulationsläufen, beispielsweise für Parameterstudien, durchzuführen.

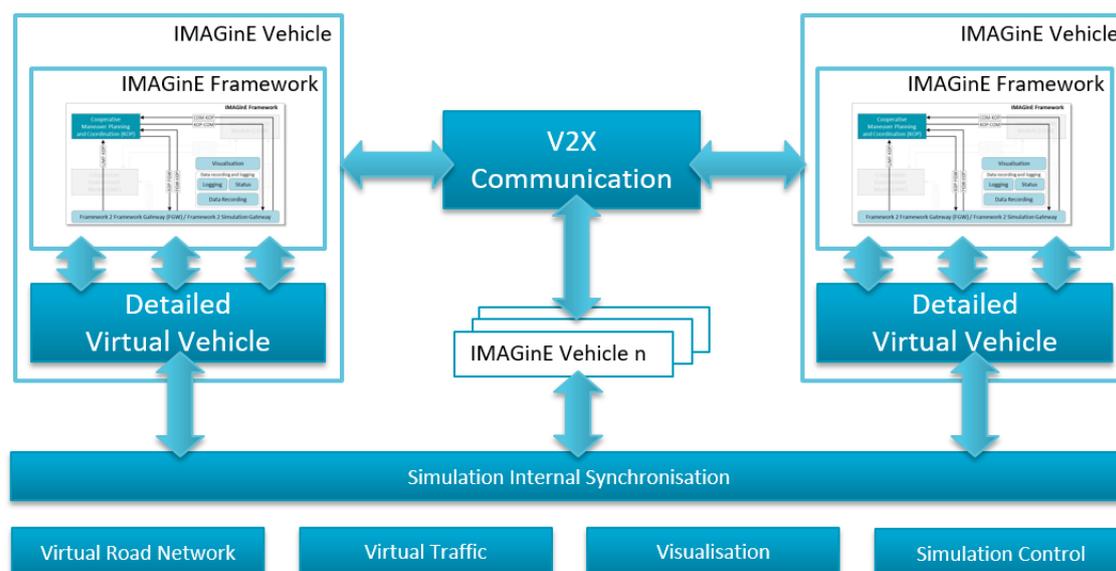


Abbildung 45: Abstrahierte Darstellung der IMAGinE-Simulationsarchitektur

Konkret wurde die Simulationsarchitektur neben den bereits erwähnten partnerspezifischen Simulationen in einer projektbegleitenden Referenzsimulation umgesetzt, die innerhalb des Projektes auch als IMAGinE-Simulationsumgebung bezeichnet wurde. Als Basis diente ein für die Anforderungen an das Projekt erweiterter CarMaker. Den kooperativen Algorithmen im IMAGinE-System werden unter anderem eine entsprechende Straßenrepräsentation mit Spurinformationen oder Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie statische bzw. dynamische Daten des Ego-Fahrzeuges, wie beispielsweise die aktuelle Position auf eben dieser Straße, bereitgestellt. Mit Hilfe einer speziellen API werden die Straßeninformationen in der Standardimplementierung unmittelbar vor einem Simulationslauf auf Basis der simulationsinternen Straßendefinition in das IMAGinE-Straßenformat konvertiert. Der Datenaustausch zum IMAGinE-System basiert auf den von ROS bereitgestellten Kommunikationsmechanismen. Hierzu wurden Botschaften mit projektspezifischen Inhalten generiert und in der Simulationsumgebung implementiert. Basierend auf diesen Informationen können vom Manöverplaner entsprechende Trajektorien generiert werden, die vom virtuellen Fahrzeug entgegengenommen und mit einem simulationsinternen generischen Fahrdynamikregler eingeregelt werden. Durch unterschiedliche Sensoren für die Umfelderkennung können den Algorithmen Objektlisten übergeben werden, die ebenfalls in der Planung berücksichtigt werden können. Die folgende Abbildung zeigt die Konfiguration für drei IMAGinE-Fahrzeuge. Sie besitzen einen identischen Detaillierungsgrad mit realistischem Fahrverhalten und jeweils ein eigenständiges IMAGinE-System. Mittels V2X-Kommunikation werden die für die Kooperation notwendigen Botschaften ausgetauscht, mit der die Fahrzeuge dann aktiv miteinander interagieren können. Diese kann als idealisiertes bzw. fehlerbehaftetes Modell mit beispielsweise einer Ausfallrate oder Reichweite oder aber auch mit Anbindung an eine reale V2X-Hardware umgesetzt sein. Die einzelnen Komponenten der Gesamtsimulation werden in AP2.3 näher erläutert.

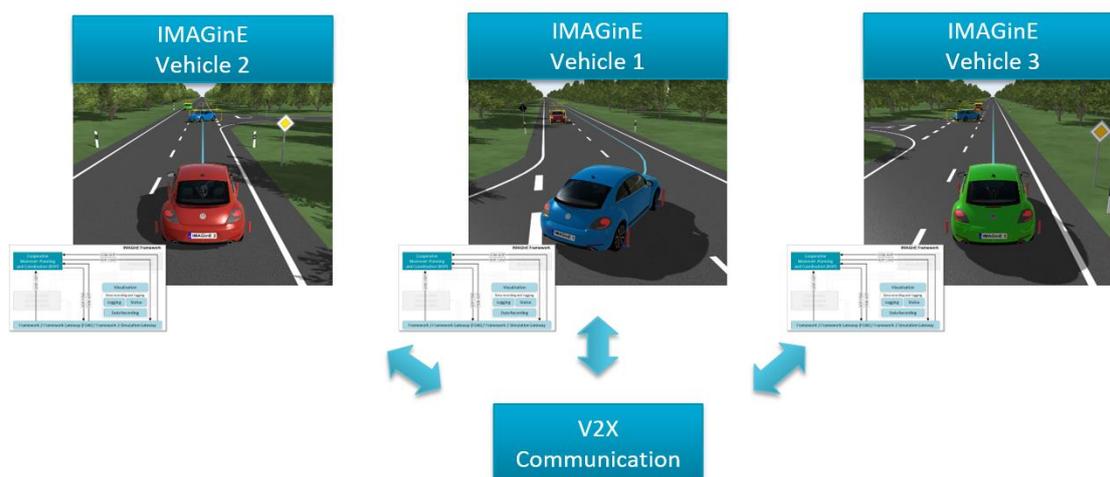


Abbildung 46: Simulation mit drei IMAGinE-Fahrzeugen

Zentrales Ergebnis von AP3.4 ist eine auf die Anforderungen des Projektes abgestimmte Simulationsumgebung zur Entwicklung und Evaluierung der IMAGinE-Funktionen. Von der Konzept- und Entwicklungsphase bis hin zur Integration in die realen Fahrzeuge war sie fester Bestandteil des reproduzierbaren und gefahrlosen Testens. Somit war es bereits in einer frühen Ausbaustufe möglich, Schnittstellen zum späteren IMAGinE-System zu verifizieren. Dies erlaubte eine effektive Vorbereitung der im Rahmen von TP4 durchgeführten Integrationsworkshops mit den realen Versuchsfahrzeugen, noch bevor die eigentlichen IMAGinE-Funktionen verfügbar waren. Durch die Anbindung an die reale V2X-Hardware konnten von den realen Fahrzeugen gesendete Botschaften visualisiert und deren Inhalt bewertet werden. Eine zentrale Rolle spielte die Simulationsumgebung im ersten gemeinsamen Unterauftrag zur Entwicklung der kooperativen Manöverabstimmung (GUA1) der im Rahmen von TP2 bearbeitet wurde. Mit Hilfe ausgewählter Simulationsszenarien wurden die Algorithmen nicht nur entwickelt, sondern auch hinsichtlich ihrer Funktionalität bewertet und optimiert (weitere Informationen siehe AP2.3).

Auch im zweiten gemeinsamen Unterauftrag zum kooperativen Umfeldmodell (GUA2) wurde die IMAGinE-Simulationsumgebung als Gegenstelle für die Entwicklung eingesetzt. Hierbei agierte sie insbesondere als Datenlieferant sowohl von idealisierten als auch fehlerbehafteten Objektlisten und IMAGinE-Straßeninformationen. Begleitend zur Integration der IMAGinE-Funktionen in die realen Fahrzeuge innerhalb des TP4 wurde die Simulation sowohl in der Vorbereitung der Workshops auf dem Testgelände, aber auch zur nachfolgenden Optimierung der Algorithmen eingesetzt. Einen speziellen Anwendungsfall fand die Simulationsumgebung beim Einsatz mit der Vehicle-in-the-Loop (VIL) Methode. Hierbei wurden einem realen IMAGinE-Fahrzeug auf der realen Teststrecke von der Simulation virtuelle Kooperationspartner bereitgestellt. Die IMAGinE-Funktionen konnten so mit nur einem realen Fahrzeug getestet und optimiert werden. Darüber hinaus dienten sie als Basis für partnerspezifische Simulationsaufbauten innerhalb derer einzelne Komponenten, wie beispielsweise der Manöverplaner, ausgetauscht oder erweitert wurden. Im Rahmen des TP5 konnten die umgesetzten Simulationsumgebungen letztend-

lich auch für die Evaluation der technischen Komponenten, aber auch in Kombination mit Verkehrsflusssimulationen zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkung eingesetzt werden. Hierzu war es möglich, auf die bereits zur Entwicklung des IMAGinE-Systems erstellten Szenarien zurückzugreifen und diese entsprechend den Anforderungen der spezifischen Untersuchungsgegenstände zu erweitern. Einen weiteren Anwendungsfall fand die Simulationsumgebung im Rahmen einer Demonstratorstudie. In einer gekoppelten Simulation aus Fahrzeugsimulation und Fahrsimulator war es den Experten möglich, ausgewählte IMAGinE-Funktionen außerhalb der realen Fahrversuche erleben zu können.



Abbildung 47: Unterschiedliche Anwendungsfälle der IMAGinE-Simulationsumgebung

Insgesamt hat der Einsatz einer projektbegleitenden Referenzsimulation die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern aber auch mit den Unterauftragnehmern deutlich vereinfacht. Zentrale Module konnten nicht nur gemeinsam entwickelt, sondern auch mit einem partner- bzw. funktionspezifischen Fokus getestet und anschließend übergreifend optimiert werden. In Anbetracht der hohen Komplexität des Gesamtsystems war es mit verhältnismäßig geringen Anpassungen ebenso möglich, die entwickelten Softwarekomponenten in den von der Referenzsimulation abgeleiteten partnerspezifischen Simulationsaufbauten in Betrieb zu nehmen. Die in AP3.4 gemeinsam erarbeitete IMAGinE-Simulationsumgebung hat maßgeblich zum Erfolg der erreichten Projektziele beigetragen. Das Konzept einer projektbegleitenden Referenz-Simulationsbasis sollte auch für zukünftige Vorhaben berücksichtigt werden.

3.3.5 AP3.5: Fahrsimulation und Fahrverhalten

Ziel von AP3.5 war, die in AP2.4 gestalteten *MMI-Lösungen* unter Idealbedingungen um die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion *unter Unsicherheitsbedingungen*, die im Realbetrieb auftreten, zu erweitern. Dabei sollten Unsicherheitsbedingungen wie Falschinformationen oder Abbruchbedingungen berücksichtigt werden. Die erweiterten Interaktionskonzepte für Unsicherheitsbedingungen sollten anschließend in unterschiedlichen Fahrsimulationsumgebungen (Pkw und Lkw) integriert und in Probandenversuchen als Teil der kooperativen Use Cases verglichen und optimiert werden. Des Weiteren können aus den Probandenversuchen Parameter, wie die Wahrscheinlichkeit eines Manövers und die Zeit bis zum Manöver, gewonnen werden. Anhand dieser Erkenntnisse sollten Annahmen getroffen werden, wann und in welche Lücke der Fahrer eines assistierten Fahrzeugs einscheren will. Kooperationsrelevante Ansätze zur Fahrerintentionserkennung sollten somit um den Aspekt der Unsicherheit ergänzt werden. Aus den Ergebnissen der empirischen Studien sollten abschließend Gestaltungsempfehlungen für die Umsetzung im Realfahrzeug abgeleitet und die verwendeten Metriken aus TP2 verfeinert werden.

Um alle AP3.5-Partner (WIVW, TUM, MAN, VW, Opel) zum Start des AP3.5 abzuholen und einen Überblick über die Studien aus AP2.4 und deren Ergebnisse zu schaffen, wurde ein Kick-Off abgehalten. Zudem wurden in einem Workshop zum Thema „Abbruchkriterien innerhalb der IMAGinE-Funktionen“ in Gruppenarbeiten Abbruchkriterien definiert, sortiert und nach Relevanz bewertet. Die untenstehende Tabelle zur Übersicht der in AP3.5 durchgeführten Studien listet die untersuchten Abbruchkriterien auf.

Insgesamt wurden in AP3.5 sieben Studien durchgeführt (siehe Tabelle). Die Studien der Partner WIVW, TUM, MAN und VW wurden dabei in Fahrsimulatoren abgehalten.

Das WIVW fokussierte sich in seinen Studien auf die Weiterentwicklung eines Mensch-Maschine-Interaktion-Konzeptes im Pkw für die Funktionen F1 und F5 und untersuchte die Reaktion von Pkw-Fahrern im Störfall beim Einfädeln und Linksabbiegen mit einem kooperativen Assistenten. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen der Erklärungstiefe in Abbruchsituationen beim manuellen und automatisierten Fahren auf die Akzeptanz des Systems überprüft.

Der Lehrstuhl TUM-LfE führte im Rahmen des AP3.5 Versuche zur Entwicklung eines Mensch-Maschine-Konzeptes im Pkw für die Funktion F3 durch und bewertete die Auswirkungen von Fehlalarmen bei der Überholwarnung auf Landstraßen mit Pkw-Fahrern sowie die Auswirkungen auf die Risikobereitschaft beim Überholen und das Vertrauen in das System.

Als weiterer Lehrstuhl untersuchte der TUM-FTM in Bezug auf Funktion F6 zum kooperativen Überholen durch Lkw auf Autobahnen die Notwendigkeit, ob eine Kooperationsanfrage beim assistierten Fahren bestätigt werden müsse. Des Weiteren wurde die Darstellung des Informationsinhalts in Icons bzw. Icons mit Text evaluiert und die Reaktion von Lkw-Fahrern im Störfall beim Überholen mit einem kooperativen Assistenten erhoben.

MAN beteiligte sich dabei gesondert in der Entwicklung eines MMI-Konzepts für einen kooperativen Überholassistenten für Lkw auf Autobahnen in der hochautomatisierten Fahrt.

Darüber hinaus evaluierte VW MMI-Prototypen für die Funktionen F1 und F3 am Laboraufbau und führte eine Probandenstudie zur Untersuchung der Benutzerfreundlichkeit und Verständlichkeit der Assistenzsysteme zum kooperativen Einfädeln an Anschlussstellen sowie dem kooperativen Überholen auf Landstraßen durch.

Basierend auf den Fahrsimulatorstudien lag der Fokus der Arbeit von *Opel* auf der Weiterentwicklung der Fahrerintentionserkennung. Die MMI-Studie von Opel nimmt eine Sonderrolle ein, da keine empirische Fahrsimulatorstudie durchgeführt, sondern bereits erbrachte empirische Daten zur Entwicklung eines Fahrerintentionserkenners für das kooperative Fahren analysiert wurden.

Tabelle 7: Übersicht der in AP3.5 durchgeführten Studien

Partner	Kurztitel	Funktion	Unsicherheitsbedingungen
WIVW	Studie 1 - Systemgrenzen	Funktion - F1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen Funktion - F5: Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	<ul style="list-style-type: none"> • Kooperationspartner verhält sich nicht wie vereinbart • Unerwartetes, nicht prädiziertes Verhalten eines Fahrzeugs • Systemausfall • Kommunikationsübertragungsfehler • Fehlfunktion
	Studie 2 - Funktionsabbruch	Funktion - F1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen Funktion - F5: Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	<ul style="list-style-type: none"> • Systemausfall • Kooperationspartner verhält sich nicht wie vereinbart
TUM-LfE	Studie 1 - Fehler eines Überholwarnsystems	Funktion - F3: Kooperatives Überholen auf Landstraßen	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlalarm oder Ausbleiben eines Alarms
TUM-FTM	Studie 1 - Unsicherheitsbedingungen	Funktion - F6: Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	<ul style="list-style-type: none"> • Kooperationspartner verhält sich nicht wie vereinbart • Unerwartetes, nicht prädiziertes Verhalten eines Fahrzeugs • Systemausfall
MAN	Studie 1 - MMI für teilautomatisierte Überholmanöver	Funktion - F6: Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	-
VW	Studie 1 - MMI-Evaluation	Funktion - F1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen	-

Partner	Kurztitel	Funktion	Unsicherheitsbedingungen
		Funktion - F3: Kooperatives Überholen auf Landstraßen	
Opel	Studie 1 - Detektion der Kooperationsbereitschaft	Funktion - F1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen	-

Zum Abschluss der Studien präsentierten die AP3.5-Partner ihre Studienergebnisse und diskutierten daraus abgeleitete Leitsätze der MMI-Gestaltung. Die aus den Probandenstudien herausgearbeiteten Anforderungen an ein erweitertes MMI-Konzept, in dem zu erwartende Unsicherheitsbedingungen Berücksichtigung finden, wurden im internen Deliverable D3.5 dokumentiert. Die verwendeten Metriken und Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen und Leitsätze für kooperative Systeme stehen den Partnern in diesem 276 Seiten umfassenden Dokument zur weiteren Verwertung zur Verfügung. Die entwickelten *Leitlinien der MMI-Gestaltung* von Fahrerassistenzsystemen für kooperatives Fahren umfassen die Bereiche

- Funktionsübergreifende MMI-Prinzipien und Erkenntnisse
 - Design der Schnittstelle (z.B. Umfeldansicht (Ego-Fahrzeug + umliegender Verkehr) im Head-Up-Display (HUD) bzw. Kombiinstrument hilfreich, um Kooperationspartner und -situation zu erkennen; Darstellung im HUD zieht Aufmerksamkeit des Fahrers von der Betrachtung des relevanten Verkehrsumfelds am wenigsten ab)
 - Interaktion mit dem System (Gefahr des „Über-Vertrauens“ in das System zum kooperativen Fahren besteht)
 - Fahrerinformation (Abbruchgrund in Form von Text oder Icon angeben, um Vertrauen in das System zu erhöhen)
- Funktionsweise und -charakteristik kooperativer Assistenz
 - Generelle Akzeptanz (Assistenz zur Unterstützung kooperativen Fahrens wird akzeptiert)
 - Funktionalität (z.B. zeitgleicher Abbruch von Kooperation und Automation ungeeignet)
- Erkenntnisse zur Methodik und verwendeten Metriken (z.B. Fragebogen nach Van der Laan (Van der Laan et al., 1997 [8]) zur Messung der Akzeptanz, User Experience Questionnaire (UEQ) (Laugwitz et al., 2008 [9]), System-Usability-Scale (Brooke, 1996 [10]))

AP3.5 wurde mit der Finalisierung des Deliverable D3.5 im Jahr 2019 abgeschlossen.

3.3.6 Zielerreichung

In AP3.1 wurde die Spezifikation für das Kooperative Umfeldmodell erstellt. Es wurden die Beauftragung und die Umsetzung koordiniert sowie die Abnahmen durchgeführt. Die Abnahmen fanden sowohl in Simulation als auch im Fahrzeug statt. Die Durchführung dieser Tests wurden im Rahmen von TP4 durchgeführt.

Im Rahmen von AP3.2 wurden die Basiskonzepte für die kontinuierliche, die rollenbasierte und die infrastrukturbasierte Manöverabstimmung erstellt. Ebenso wurde die Spezifikation für das IMAGinE-Abstimmungskonzept erstellt und an TP2 übergeben. Die verschiedenen Ausprägungen für die Untersuchungen der unterschiedlichen Aspekte der Manöverabstimmung wurden im Rahmen von TP2 koordiniert.

AP3.3 hat die benötigten Services für die V2X-Nachrichten spezifiziert und das Kommunikationsmodul umgesetzt. Es wurde der Einfluss der Maneuver Coordination Message (MCM) auf den Kommunikationskanal untersucht. Zudem wurde der Strategische Support Server spezifiziert und realisiert.

Das IMAGinE-Simulations-Framework als die zentrale Umgebung für die Tests und Untersuchungen der IMAGinE-Kerntechnologien wurde in AP3.4 umgesetzt. Es umfasst die Anbindung an die IMAGinE-Manöverabstimmung sowie an partnerspezifische Simulationsumgebungen. Das Simulationswerkzeug IPG CarMaker als zentrale Komponente wurde um wichtige Module wie die V2X-Kommunikation einschließlich des Austausches von Trajektorien sowie die Testautomatisierung erweitert.

Die Aspekte der Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Manöverabstimmung wurden aufbauend auf den Arbeiten von TP2 genauer untersucht. Im Unterschied zu den idealen Bedingungen aus TP2 wurden im Rahmen von AP3.5 die Einflüsse von Störungen bzw. von nicht-idealen Bedingungen untersucht.

Gemeinsam und in Abstimmung mit anderen Teilprojekten wurden so alle gesetzten Ziele erreicht.

3.4 TP4: System- und Fahrzeugintegration

3.4.1 Zielsetzung

TP4 hatte die Aufgabe, die unterschiedlichen Teilergebnisse aus vorangegangenen TPs in die Versuchsfahrzeuge und Simulatoren zu integrieren. Die in IMAGinE erstellten Softwaresysteme sollten auf einem Referenzsystem lauffähig sein, dem IMAGinE-System. Dieses IMAGinE-System sollte sich dann mit den Versuchsfahrzeugen und Simulatoren der unterschiedlichen Partner kombinieren lassen.

Nach der VHB 3.1 waren die Kernergebnisse des TP4 wie folgt definiert:

- Aufbau und Test der Versuchsfahrzeuge
- Integration und Test der kooperativen Funktionen und der Manöverplanung in den Fahrzeugen oder Simulatoren
- Systemintegration der Teilkomponenten in die Fahrzeuge oder Simulatoren
- Integration und Test des kooperativen Umfeldmodells

Die Arbeitspakete in TP4 waren aufeinanderfolgend angeordnet und konnten von AP4.1 bis AP4.4 durchgearbeitet werden.

In **AP4.1** sollten die Versuchsfahrzeuge auf die Bedürfnisse des IMAGinE-Systems angepasst werden. Dazu sollte ein Integrationsplan erstellt werden, der Teil des D4.1 ist, aber in den Arbeiten der anschließenden APs weiter verfeinert wurde. Weiterhin haben in diesem AP die Partner ihre Versuchsfahrzeuge für das IMAGinE-System vorbereitet.

Das IMAGinE-System wurde in **AP4.2** aufgebaut und in Betrieb genommen. Das IMAGinE-System besteht aus dem Zusammenschluss des IMAGinE-Rechners, der waveBEE und einer partnerspezifischen Positionierungslösung. Anders als in der VHB beschrieben wurde das Framework2Framework Gateway (FGW) bereits in AP4.2 aufgesetzt, um eine erste Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und dem IMAGinE-System darzustellen. Dies führte auch zu den ersten Workshops, bei denen die grundsätzliche Funktionalität der Fahrzeuge und der Kommunikation der Fahrzeuge untereinander dargestellt worden ist.

Die kollektive Perzeption war das Thema in **AP4.3**. Das kooperative Umfeldmodell aus AP3.1 wurde zusammen mit den Anpassungen zur Collective Perception Message (CPM) aus AP3.3 in die Versuchsfahrzeuge integriert. Die weitere Komplexität des Gesamtsystems über verschiedene Fahrzeuge und deren Sensorik wurde mit Simulatoren unterstützt, die virtuelle Objekte an die Fahrzeuge senden konnten. Diese Möglichkeiten wurden in AP3.4 aufgebaut.

In **AP4.4** wurden die kooperativen Manöver im Fahrzeug und in Simulation in Betrieb genommen und so weit angepasst, dass die Manöverkoordination nach den unterschiedlichen Verfahren der Partner erprobt werden konnten. Dies galt auch für die Manöverplanung aus AP3.2. Dafür wurde die Simulation in zwei übergeordneten Schritten verwendet. Im ersten Schritt der Entwicklung der Manöverplanung wurde parallel die Software getestet. Hier wurden auch unterschiedliche Szenarien erstellt, um sowohl die Robustheit als auch die Performance auf der Zielplattform zu evaluieren. Im weiteren Schritt wurden Referenzdurchläufe erstellt, die jedes Mal simuliert worden sind, bevor eine Software in die Versuchsfahrzeuge integriert worden ist. Dies sollte verhindern, dass in der Manöverplanungssoftware Fehler passierten, die bereits im Vorfeld hätten ausgeschlossen werden können. Letztendlich wurden die Manöver F1, F4 und F5 im Realversuch in Pferdsfeld sowohl für die manuelle als auch die automatisierte Fahrt erprobt.

3.4.2 AP4.1: Fahrzeugaufbau und Integrationsplan

AP4.1 bildete den Auftakt für die Integrationsarbeiten der IMAGinE-Softwaresysteme in eine gemeinsame Referenzumgebung (IMAGinE-System) und die Schnittstellendefinition an partnerspezifische Systeme. Die übergeordneten Ziele sind laut VHB

- Erstellung eines Integrationsplans
- Ausrüsten der Versuchsfahrzeuge mit partnerspezifischem Umfeldmodell
- Konzept der Anbindung des IMAGinE-Systems an Versuchsfahrzeuge
- Konzepte Fahrzeugintegration MMI
- Konzepte Logdaten
- Integrationspläne für das Deliverable D4.1 Fahrzeugintegration

An dieser Stelle haben sich an der Interpretation der Ziele Änderungen ergeben. Statt eines starren Integrationsplans wurde eine übergeordnete Architektur mit bestimmten Aspekten wie Zeitsynchronisation, Schnittstellen zum partnerspezifischen System und einheitlicher Rechnerarchitektur bestimmt. Die einzelnen Schnittstellen haben sich im Laufe des Projekts mehr

und mehr verfeinert und sind daher Gegenstand späterer Arbeitspakete gewesen. Die Konzepte zur MMI-Integration sind über die allgemeine Schnittstellendefinition vorbereitet gewesen und wurden ebenfalls zu einem späteren Zeitpunkt konkretisiert, um die Darstellung den Fahrfunktionen anzupassen.

Im Rahmen von AP4.1 wurde die generelle Architektur des IMAGinE-Systems erstellt und gepflegt. Dabei wurde insbesondere auf die Integrationsfähigkeit in die Partnersysteme geachtet. Dazu zählt die Einigung darüber, welche Komponenten des Systems gemeinsam umgesetzt werden, bzw. für welche die Funktionalität durch die jeweiligen Partner sichergestellt sein muss. Dies wird im ersten Zwischenergebnis *Schnittstellendefinition und Übertragungsprotokolle* als Teil des D4.1 festgehalten. Die zu behandelnden Themen sind

- Zeitsynchronisation
- Logging und Messdatenaufzeichnung
- Verortung der Karte
- Framework 2 Framework Gateway (Schnittstelle zwischen dem IMAGinE- und dem partnerspezifischen System)
- Erstellen einer Schnittstellenkarte für das Zusammenspiel der einzelnen Module

Zusätzliche wurde die weitere Integration durch folgende Arbeiten unterstützt:

- Erstellung der IMAGinE Common API
- Bestimmung der Simulationsschnittstelle
- Überprüfung der in AP2.2 definierten Daten für das Framework 2 Framework Gateway auf Umsetzbarkeit im Fahrzeug

Neben den gemeinsamen Aktivitäten wurde in diesem AP der Grundstein für die Fahrzeugaufbauten gelegt. Die Partner haben im Rahmen von AP4.1 ihre Fahrzeuge entweder partnerspezifisch für IMAGinE umgebaut oder Serienfahrzeuge als Versuchsfahrzeuge hochgerüstet. In späteren APs sollten diese mit den IMAGinE-Systemen ausgestattet werden.

3.4.2.1 Übergeordnete Architektur

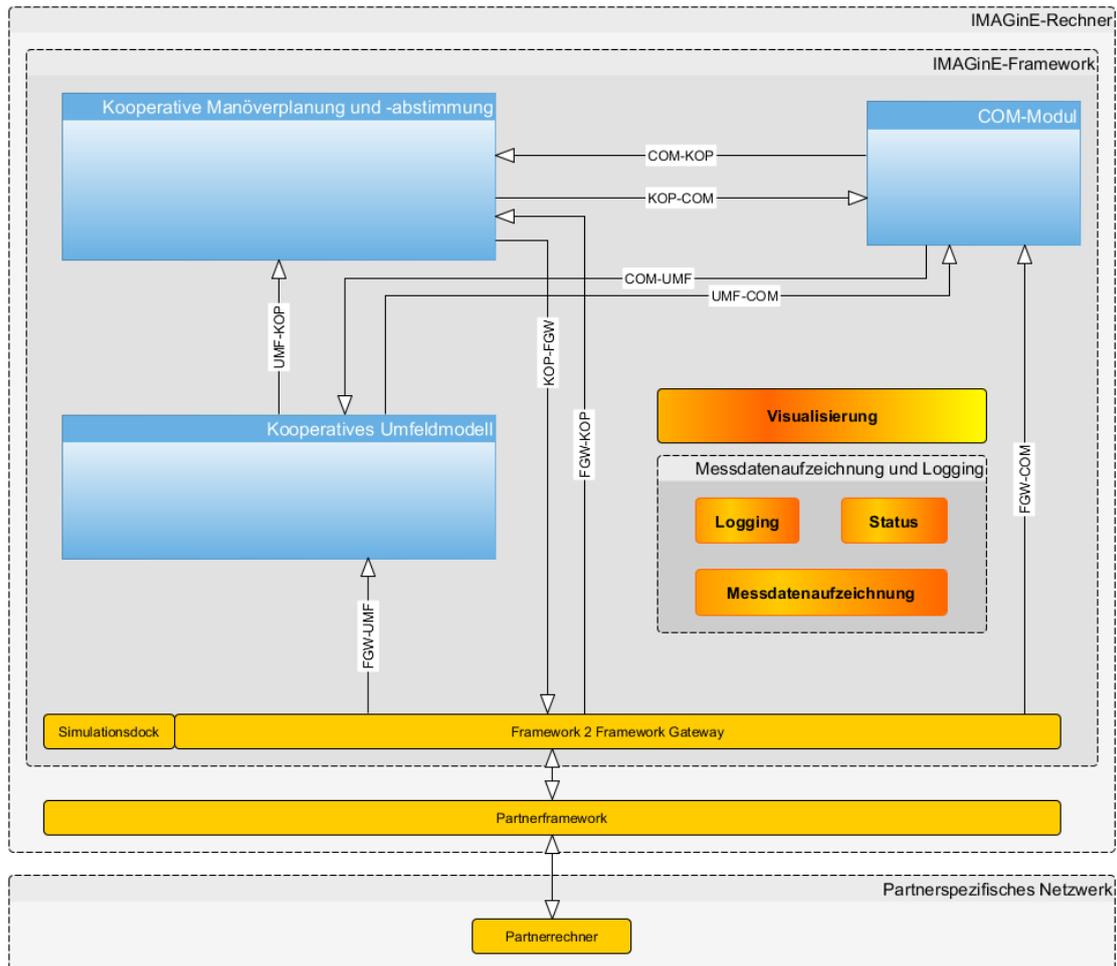


Abbildung 48: Übergeordnete IMAGinE-Architektur mit Schnittstellenbezeichnungen

Die dargestellte Systemarchitektur beschreibt den IMAGinE-Funktionsrechner und die Anbindung nach außen. Der Funktionsrechner wird mit der Kommunikationskomponente *waveBEE* via Ethernet zu einem Verbund zusammengeschlossen, um so das IMAGinE-System zu bilden. Aufgrund der Zeitkritikalität vieler Komponenten (Sensoren, Aktoren, V2X-Nachrichten, etc.) ist eine genaue und synchronisierte Zeit im Gesamtsystem besonders wichtig. Im Projekt wurde sich darauf verständigt, die GPS-Zeit als Basis zu nutzen. Neben der *waveBEE* steht bei den meisten Partnern eine eigene Positionierungslösung zur Verfügung. Beide Systeme können demnach Position und GPS-Zeit liefern. Im weiteren Verlauf wird auf die Kurzbezeichnungen der Schnittstellen eingegangen, die in dieser Grafik zu finden sind. In der folgenden Tabelle sind die Abkürzungen erläutert.

Tabelle 8: Abkürzungen in der IMAGinE-Architektur

Bezeichnung	Beschreibung
COM	Kommunikationsmodul: Schnittstelle zur waveBEE
FGW	Framework 2 Framework Gateway
KOP	Kooperative Manöverabstimmung und -planung
UMF	Kooperatives Umfeldmodell

Die vereinfachte Systemarchitektur beschreibt eine Zuordnung von allgemeinen Softwaremodulen, die die Funktionalität im IMAGinE-Funktionsrechner darstellt. Diese Module werden in einem gemeinsamen Grundsystem, basierend auf Linux und Robotic Operating System (ROS) lauffähig sein. Ein Teil der Module wird in gemeinsamen Unteraufträgen im Rahmen von TP2 und TP3 entwickelt. Dieses System wird weiter ausgearbeitet und bestimmte Unterstützungsfunktionalitäten wie das Logging bzw. die Messdatenaufzeichnung werden vorbestimmt. Weiterhin gehört das Framework 2 Framework Gateway zu diesem Grundsystem dazu. Zusätzliche Softwaremodule, die erforderliche Messgrößen für die Untersuchungen in TP5 bereitstellen, werden im weiteren Verlauf des TP4 spezifiziert und implementiert.

3.4.2.1.1 Zeitsynchronisation

Das IMAGinE-System bezieht seine Zeitreferenz mit Hilfe der waveBEE über die GPS-Zeit. Diese setzt ihre Systemzeit basierend auf dem verbauten GPS-Empfänger von μ Blox mit Hilfe des ntp-Daemons. Anschließend kann die Systemzeit der waveBEE im Fahrzeugnetzwerk verteilt werden. Als prinzipielle Methode wird hier Network Time Protocol (NTP) angeboten, da diese ohne spezielle Hardware einsetzbar ist. Als Alternative steht auch das Precision Time Protocol (in unserem Fall das Derivat gPTP) zur Verfügung. Dieses System benötigt allerdings spezielle Netzwerkkarten sowie Switches, die eigene Hardware-Uhren enthalten. Die Netzwerkkarten in der waveBEE und des IMAGinE-Rechners unterstützen gPTP, daher ist eine sehr genaue Synchronisation mit Hardwareunterstützung innerhalb des IMAGinE-Systems möglich.

3.4.2.1.2 IMAGinE-Rechner

Für die Beauftragung der gemeinsamen Unteraufträge GUA1+ und GUA2, die als Ergebnis die Softwareimplementierung von Teilsystemen für das IMAGinE-System haben, wurde eine Basis benötigt, in der diese Softwaremodule eingearbeitet werden können. Teilweise war diese Basis durch die Festlegung auf das Ubuntu Linux-Betriebssystem und die Entwicklungsplattform ROS bereits vordefiniert. Zum anderen mussten gemeinsame Festlegungen und Basisimplementierungen vorgenommen werden, um eine möglichst nahtlose Inbetriebnahme im gemeinsamen System zu gewährleisten.

Ein Teil dieser Basisimplementierung bildet die „Datenaufzeichnung und Messtechnik“. Diese wird sowohl für die gemeinsamen Unteraufträge, aber auch darüber hinaus für weitere Entwicklungs- und Erprobungsaufgaben genutzt. Die Festlegung auf gemeinsame Standards erlaubt

letztendlich auch die automatisierte Zusammenführung von Logdaten, um die kooperativen Manöver besser analysieren zu können.

Um eine bessere Übersicht zu gewinnen, wurden die unterschiedlichen Kategorien für Mess- und Logdaten bestimmt.

- Interfacedaten: Daten, die zwischen Softwaremodulen ausgetauscht werden.
- Textuelle Logdaten: Log-Benachrichtigungen im Klartext
- Modulstatus: Diagnoseanzeige, um den aktuellen Zustand des Systems zu überblicken
- Videodaten: Optionale Aufzeichnung von Videos

Alle diese Daten werden mit der jeweiligen Systemzeit versehen, so dass klar ersichtlich ist, wann ein Datenpaket erstellt worden ist. Durch eine GPS-Zeitsynchronisation des Systems sollen diese Daten auch fahrzeugübergreifend vergleichbar werden.

Zur Messdatenaufzeichnung sollen primär die Mittel genutzt werden, welche zu ROS gehören. Diese Möglichkeiten, die unter dem Begriff *rosbags* zusammengefasst sind, dienen der Messdatenaufzeichnung. Es ist aber auch möglich, dieses Messdatenaufzeichnen für textuelle Logdaten zu verwenden. Über ein spezielles Topic können Module Informationen schicken, die dann durch *rosbags* aufgezeichnet werden. Im Rahmen der IMAGinE Common API wird der Modulstatus gesetzt, so dass es für jedes Modul einen Systemstatus gibt, welcher sowohl über *rosbags* aufgenommen werden kann, aber auch durch zusätzliche Module überwacht und zur Darstellung gebracht werden kann.

3.4.2.1.2.1 Messdatenaufzeichnung und Logging

Das Modul Messdatenaufzeichnung und Logging ist aufgeteilt in drei Mechanismen. Diese sind

- Logging Data: Logdatenaufzeichnung: Textuelle Rückmeldung aus den Funktionen, bzw. dem System.
- Interface Data: Messdatenaufzeichnung via ROSBags. Es können die Daten aufgezeichnet werden, welche als Topics im ROS definiert sind.
- Modulstatus: Status einzelner Module.

Neben dieser Aufteilung und der entsprechenden Beschreibung wurden Vereinbarungen definiert, wie die Zuordnung von „Logging Data“ auszusehen hat. Des Weiteren wurde der „Modulstatus“ definiert, so dass diese Vereinbarungen als Programmcode erstellt werden können. Die Aufzeichnung für „Interface Data“ benötigt keinen selbst erstellten Mechanismus, da dieser mit den ROSBags bereits vorhanden ist. Dies beinhaltet bereits viele Möglichkeiten, die sonst neu entwickelt worden wären.

3.4.2.1.2.2 Messgrößenbewertung

Im Rahmen von AP5.1 wurden im Vorfeld, abhängig von den kooperativen Manöverfunktionen, Messgrößen definiert, die für die Evaluation in TP5 notwendig wurden. Eine Liste dieser Messgrößen wurde über alle Funktionen zusammengeführt und bewertet. Anschließend wurde ermittelt, welche Messgrößen bereits durch die vorgegebene Schnittstellendefinition im System vorhanden sind und welche möglicherweise berechnet werden müssen. Anschließend wurde besprochen, welche dieser Messgrößen als Live-Daten erzeugt werden müssen und welche in einem Postprocessing erzeugt werden können. Die übrig gebliebenen Live-Daten, die nicht direkt im System vorhanden sind, mussten durch entsprechende Softwaremodule generiert werden, die für das IMAGinE-System entwickelt worden sind.

3.4.2.1.2.3 IMAGinE Common API

In AP4.1 wurde erstmals die Bedeutung einer ROS-unabhängigen Abstraktionsschicht für IMAGinE-Softwaremodule herausgearbeitet. Dieses sollte die IMAGinE Common API darstellen. Hier wurden erste Anforderungen an diese Framework-Unabhängigkeit definiert, die im Rahmen von AP4.2 in Software umgesetzt worden ist.

Die folgenden Anforderungen ergaben sich dadurch, dass ROS viele Möglichkeiten bietet, die zwar nutzbar bleiben, aber nicht explizit in den Algorithmen aufgerufen werden sollten. Diese betreffen die Themen

- Keine ROS-spezifischen Datentypen in den Softwaremodulen
- Messtechnik- und Loggingaufrufe
- Statusmeldungen
- Visualisierungen
- Zeitvorgabe

Diese wurde im Rahmen von AP4.2 ausgearbeitet und vor allem GUA1 und GUA2 als Vorgabe mitgegeben, um mögliche Portierungen der IMAGinE-Software jenseits des ROS-Frameworks zu erleichtern.

3.4.2.1.3 Simulationsschnittstelle

Die Simulationsumgebung erlaubt es, anders als reale Komponenten, eine andere Zeitbasis zu verwenden als die Echtzeit. Dies kann unterschiedliche Gründe haben, aber Anwendungsfälle existieren sowohl für langsamere als auch schnellere Simulationsdurchläufe als Echtzeit.

- Langsamere Simulation kann notwendig werden, wenn die zu entwickelnde Software auf der Testhardware nicht rechtzeitig fertig gerechnet werden kann und es somit zu Verlangsamung kommt. Dies kann man u.a. durch effizienteren Code oder schnellere Hardware beheben, bevor die Software im Realfahrzeug eingesetzt wird.

- Schnellere Simulation kann notwendig werden, wenn der Code so schnell ausführbar ist, dass es effizienter ist, wenn der Simulationsdurchlauf so schnell wie möglich abgeschlossen wird. Dies ist u.a. denkbar bei Parameterstudien, wo es am Ende auf ermittelte Kennzahlen ankommt und nicht auf den visuellen Eindruck der Simulation.

3.4.2.1.4 Framework 2 Framework Gateway

Das Framework 2 Framework Gateway (FGW) ist die zentrale Datenschnittstelle zwischen dem IMAGinE-System und den Partnersystemen. Die Anbindung an diese Schnittstelle wurde durch partnerspezifische Implementierung vorgenommen. Den Partnern war es daher selbst überlassen, Mechanismen zu entwerfen, um diese Schnittstelle zu bedienen. Eine der umgesetzten Möglichkeiten war ein ROS-Knoten, der das externe Framework angebinden hat. Da viele Partner als partnerspezifisches Framework bereits ROS in Verwendung hatten, war dieser Knoten lediglich ein Schnittstellenumsetzer und Datenkonverter. Für die Arbeiten an dem FGW wurde ein Kernteam gebildet, welches die Themen ausgearbeitet hat, um die Ergebnisse dann dem gesamten TP4 vorzustellen.

Im Zuge dieser Arbeiten wurden die ROS Topics bestimmt, welche durch das FGW beschrieben werden müssen. Diese enthalten vorwiegend Daten aus dem Fahrzeug wie Dynamik-, HMI-, Positions- und Richtungsdaten. Vom IMAGinE-System zurück in das FGW werden neben HMI-Daten auch die notwendigen Trajektorien geschickt.

Neben den generellen Daten-Festlegungen wurden Themen der technischen Umsetzung diskutiert. Es wurden unterschiedliche Ziel-Frameworks angedockt (ROS, ADTF, eCAL), welche mit diesem System funktionieren müssen. Gerade die zeitliche Komponente spielt bei der Umsetzung des FGW eine bedeutende Rolle.

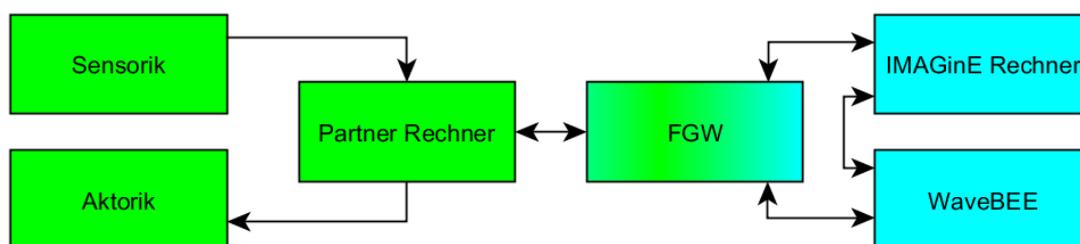


Abbildung 49: Grobe Einordnung des Framework 2 Framework Gateway. Dieses befindet sich üblicherweise auf dem IMAGinE-Rechner und übersetzt die IMAGinE-spezifischen Datenschnittstellen aus dem ROS in ein anderes ROS oder in andere Frameworks wie DDS oder eCAL.

3.4.2.2 Ausstattung der Partnerfahrzeuge

Die Versuchsfahrzeuge weisen, je nach aufbauendem Partner, ganz unterschiedliche Eigenschaften auf. Allen gemein war ein IMAGinE-System aus IMAGinE-Rechner und waveBEE, um die gemeinsamen IMAGinE-Funktionen zu gewährleisten. Die verwendeten Fahrzeuge sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 9: Ausstattung der Partnerfahrzeuge

Partner	Automationsgrad	Lokale Sensorik	Sonstiges
Continental	Automatisiert/Manuell	Radar (360°)	
Continental	Automatisiert/Manuell	Radar (360°)	
Continental	Automatisiert/Manuell	-	Als Vehicle-in-the-Loop (ViL) Simulationsfahrzeug.
Bosch	Automatisiert/Manuell	Kamera	
Bosch	Automatisiert/Manuell	Kamera	
Opel	Manuell	Kamera	
Opel	Manuell	Kamera	
Opel	Manuell	Kamera	
Autobahn	Manuell	-	
Autobahn	Manuell	-	
MAN	Manuell	Kamera	
MAN	Manuell	Kamera	

Auch Fahrzeuge ohne eigene Sensorik können über V2X-Kommunikation an der Manöverkoordination teilnehmen. Die IMAGinE-Fahrzeuge können die anderen IMAGinE-Fahrzeuge sowohl anhand ihrer Kommunikationsnachrichten erkennen (CAM, CPM, MCM) als auch über die CPM von ihrer Sensorik profitieren. Die Ausprägungen der jeweiligen Partnersysteme sind in den partnerspezifischen Berichten zu finden.

Zu Projektbeginn haben sich die Partner darauf geeinigt, dass das Thema Positionierung nicht Teil des Projekts ist und somit wurden überwiegend Referenzmesssysteme verwendet.

3.4.2.3 Ergebnis

Die Arbeiten aus AP4.1 bildeten die Grundlage der weiteren Arbeiten. Es wurde Einigung darüber erzielt, wie die kooperativen Funktionen in die bestehenden Systeme integriert werden sollen. Weiterhin wurden die Fahrzeuge der Partner auf die, bis zum jeweiligen Zeitpunkt bekannten, Erfordernisse des Projektes aufgebaut.

3.4.3 AP4.2: Inbetriebnahme und Integration des IMAGinE-Basissystems

In AP4.2 wurden, basierend auf der Systemarchitektur aus TP2, gemeinsam definierte Komponenten wie Positionierungseinheit, Kommunikationseinheit und Funktionsrechner aufgebaut. Die Einzelkomponenten wurden entweder entwickelt oder bereits fertige Komponenten wurden für den Einsatz im Projekt qualifiziert. Nach der Integration bildeten dann diese Komponenten das IMAGinE-Basissystem. Mit dieser einheitlichen Basis konnten dann das kooperativen Umfeldmodell und die kooperative Manöverabstimmung aufgebaut werden.

Ziele von AP4.2 „Umsetzung Funktionsrechner und gemeinsame Komponenten“ nach VHB waren:

- Funktionsrechner für kooperatives Umfeldmodell und Funktionen in Betrieb nehmen
- Kommunikationseinheit mit Mobilfunk- und ITS G5-Anbindung aufbauen
- Beschaffung und Inbetriebnahme der Positionierungseinheit
- Inbetriebnahme des IMAGinE-Systems
- Umsetzung des Logging-Konzepts
- Testprotokolle der Inbetriebnahme erstellen

Auf dem Funktionsrechner liefen sowohl das gemeinsame IMAGinE-Umfeldmodell, die kooperative Manöverplanung als auch die kooperativen Funktionen, die nicht an partnerspezifische Komponenten gebunden sind. Der Funktionsrechner wurde mit einem geeigneten Betriebssystem und einer geeigneten, gemeinsam verwendeten Entwicklungsumgebung (Ubuntu und ROS) in Betrieb genommen. Das Kommunikationsmodul ist eine Komponente, die sowohl Mobilfunk als auch ITS G5 unterstützt. Die erforderlichen Daten wurden über den Funktionsrechner in das Kommunikationsmodul eingespeist, damit der Kommunikationsstack nach ETSI nachgebildet werden konnte. Je nach Ausprägung der kooperativen Funktionen wurden Erweiterungen des ETSI-Standards hinsichtlich der Nachrichtenformate implementiert. Die Arbeiten daran waren Teil von AP3.3. Die anschließende Funktionsverifikation der fertigen Komponenten wurde innerhalb des Arbeitspaketes AP4.4 durchgeführt. Ergab die Verifikation einen Änderungsbedarf der Komponente, wurde dieser nach AP3.3 zurückgespiegelt und die Komponente überarbeitet. Im Rahmen des Projekts gab es eine Referenz-Kommunikationskomponente in ROS, welche allen Partnern für ihre Fahrzeugaufbauten zur Verfügung gestellt worden ist. Im Rahmen der IMAGinE-Spezifikationen war es aber auch möglich, eigene Kommunikationskomponenten einzubringen. Die Positionierungsgenauigkeit der Positionierungskomponente musste der geforderten Genauigkeit der kooperativen Funktionen entsprechen. Da der Schwerpunkt dieses Projekts auf den kooperativen Manövern lag, wurden hierzu keine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vorgesehen. Es wurde im Projekt auf eine ausreichend gute, kommerziell verfügbare Lösung zurückgegriffen. Dieses Vorgehen erlaubte allen Partnern eigene Lösungen für die Positionierung in das Projekt einzubringen. Es wurden vorwiegend kommerzielle Referenzsysteme beschafft.

Die in AP4.1 erstellte Spezifikation zur Logdatenerzeugung des IMAGinE-Systems wurde umgesetzt. Alle Komponenten waren mit passenden Logging-Funktionen ausgestattet, so dass eine synchrone Erfassung aller erforderlicher Logdaten und eine Zusammenführung mehrerer Logdateien über eine gemeinsame Zeitbasis möglich war. Der Verbund aus Kommunikationseinheit, Positionierungseinheit und Funktionsrechner wurde als IMAGinE-System getestet. Schwerpunkt in diesem Arbeitspaket war die korrekte Funktionsweise des Datenaustauschs zwischen den Komponenten. Die Versuchsfahrzeuge wurden fertiggestellt und in Betrieb genommen. Die grundlegenden Funktionalitäten der Fahrzeugeinbauten und des IMAGinE-Systems wie Ortung, CAM- und CPM-Versand sowie die entsprechende Software, wurde in mehreren Integrationsworkshops getestet.

3.4.3.1 CAM-Integration

In den ersten gemeinsamen Workshops wurden Versand und Empfang der V2X-CAM-Nachricht sichergestellt. Dabei wurde im ersten Schritt mit dem portablen Testsystem waveBEE-Touch geprüft, ob CAM-Nachrichten versendet werden und ob die initialen Datenfelder befüllt sind. Im nächsten Schritt wurde geprüft, ob versendete Nachrichten in den Fahrzeugsystemen empfangen wurden. Diese ersten Tests konnten im Stand bzw. später bei geringer Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt werden. Daher konnten die Workshops auf dem Gelände der alten Verkehrszentrale Hessen am DRIVE Center in Frankfurt am Main durchgeführt werden. Es wurde geprüft, ob alle geforderten Nachrichtendatenfelder inklusive Varianzen zum Versenden vom jeweiligen Fahrzeugsystem gesetzt wurden. Neben der waveBEE-Touch zur Visualisierung von CAM-Inhalten wurden Visualisierungen mit dem ROS-Tool Rviz durchgeführt. Für die Simulationsumgebung CarMaker wurde eine Live-Anbindung an die V2X-Daten erstellt. Dadurch konnten in der Simulationsumgebung ebenfalls die CAM-sendenden Versuchsfahrzeuge dargestellt werden. Da die Rviz-Visualisierung und die Visualisierung parallel zur Integration der CAM in die Versuchsträger stattfanden, diente die waveBEE-Touch als Referenz.

Da das IMAGinE-System auf dem ROS-System aufgebaut ist, konnten Daten in Fehlersituationen als ROSBags aufgezeichnet werden. Die Messdaten im ROSBag-Format konnten später abgespielt werden, um die Entwicklungssysteme zu stimulieren. Sie dienen so zur Verbesserung der Implementierungen der Fahrzeugsysteme, der Rviz-Visualisierung und der CarMaker-Anbindung. Die Inhalte von ROSBag-Dateien, genauer einzelne Signalverläufe wie Fahrzeuggeschwindigkeiten, können mit ROS-Werkzeugen, wie beispielsweise dem PlotJuggler, auch leicht als Plots dargestellt werden, was sich zur Fehleranalyse als sehr hilfreich herausstellte.

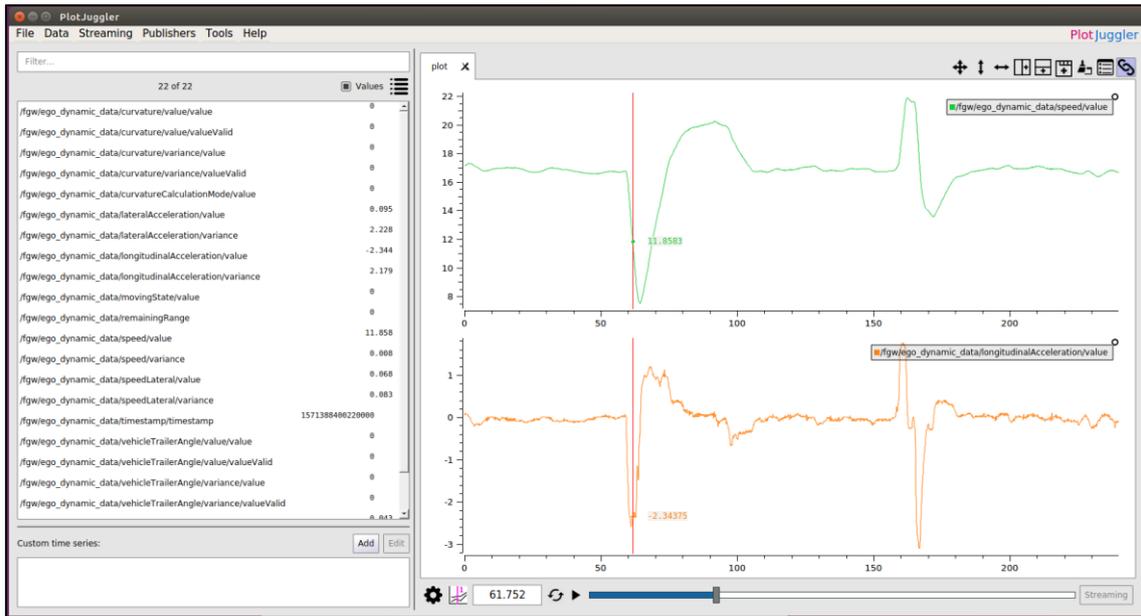


Abbildung 50: PlotJuggler

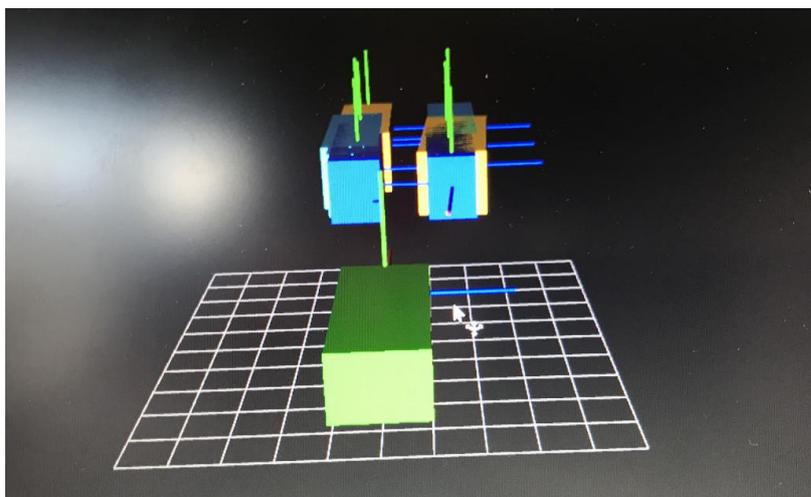


Abbildung 51: CAM-Integration beim Integrationsworkshop in Frankfurt



Abbildung 52: Darstellung der CAMs in der Simulationsumgebung

3.4.3.2 Geopositionierung, Zeitsynchronisation

Für die frühe CAM-Integration spielte die Genauigkeit der Geolokalisierung und der Zeitsynchronisation keine Rolle, da die Versuche im Fahrzeugstillstand durchgeführt wurden und nur die Plausibilität von Datenfeldern wie Geopositionen und Zeitstempel beurteilt wurden. Im Nachgang der Workshops fielen dann bei der Untersuchung der Messdaten Unstimmigkeiten auf. Da in den ROSBags auch empfangene V2X-Daten vorhanden sind, können die Sensorwerte und Zeitstempel leicht mit den Zeiten der eigenen Signale verglichen werden. Da die Geopositionierung und Zeitsynchronisation des IMAGinE-Systems in der Verantwortung der jeweiligen Partner liegt, wurden entsprechende Korrekturen in den Partnersystemen erstellt und bei weiteren Workshops erprobt. Mit stabiler werdenden Fahrzeugsystemen wurden auch einfache Fahrzeugmanöver, wie Kreisfahrten und Folgefahrten auf dem Gelände der alten Verkehrszentrale Hessen am DRIVE Center in Frankfurt am Main durchgeführt. Die aufgezeichneten und unter den Partnern ausgetauschten ROSBags konnten genutzt werden um Positionierung und Zeitsynchronität zwischen den Fahrzeugen zu vergleichen.

3.4.3.3 COM-Modul

Eine erste Version des COM-Moduls wurde von dem Partner Nordsys für ROS erstellt. Dies ermöglicht im Zusammenspiel mit der waveBEE das Versenden und den Empfang von CAM-Nachrichten. Die zu versendenden CAM-Daten werden aus den ROS-Botschaften (Topics), die vom Framework 2 Framework Gateway bereitgestellt werden, gefüllt und dann der waveBEE zum

Versenden übergeben. Auf der Empfangsseite werden die CAMs dekodiert und in eine sog. Objektliste gefüllt, die dann später vom Umfeldmodell in seiner Objektfusion berücksichtigt werden soll. In den Workshops wurde diese Liste zur Kontrolle der versendeten Daten herangezogen.

3.4.3.4 Framework 2 Framework Gateway

Die Implementierung des Framework 2 Framework Gateway war eine partnerspezifische Aufgabe und diente der Anbindung der partnerspezifischen Systeme an das IMAGinE-System. Diese Implementierung wurde bei den Partnern für die Basissignale, wie Position und grundlegende Fahrzeugdaten, umgesetzt und im Rahmen von gemeinsamen Workshops getestet. Damit wurde die Basis für eine spätere Nutzung der eigentlichen kooperativen Funktionalitäten geschaffen.

3.4.4 AP4.3: Inbetriebnahme und Integration der Umfeldmodelle

In AP4.3 wurde das partnerspezifische Umfeldmodell zusammen mit dem kooperativen IMAGinE-Umfeldmodell in Simulation und in den Fahrzeugen integriert und in Betrieb genommen. Die Entwicklung des kooperativen IMAGinE-Umfeldmodells erfolgte im Rahmen eines gemeinsamen Unterauftrages, dem GUA2. Deliverable D4.3 fasste diese Arbeiten zusammen. Die gemeinsamen IMAGinE-Komponenten wurden im Verbund der jeweiligen Fahrzeug- und Simulatorintegrationen intensiv getestet.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeiten in AP4.3 umfassten

- Fahrzeugintegration der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI)
- Inbetriebnahme des lokalen, partnerspezifischen Umfeldmodells in den Versuchsfahrzeugen und den Simulatoren
- Einbindung und Verifikation des kooperativen Umfeldmodells in die Versuchsfahrzeuge und die Simulatoren
- Dokumentation der Testergebnisse für das Deliverable D4.3 „Fahrzeuginbetriebnahme“
- Anbindung der partnerspezifischen Umfeldmodelle an das IMAGinE-System
- Bereitstellung von Testdaten für die Verifikation des IMAGinE-Umfeldmodells (GUA2)
- Integration des Support-Servers

Die Inbetriebnahme des lokalen, partnerspezifischen Umfeldmodells erfolgte durch die jeweiligen Partner. Weiterhin hatten die Partner die spezifizierten Schnittstellen des partnerspezifischen Umfeldmodells mit dem Framework 2 Framework Gateway (FGW) bereitgestellt. Entsprechend der umgesetzten Funktionen wurden die erforderlichen Schnittstellen bedient, um eine Demonstration der jeweiligen Funktion zu gewährleisten. Softwaremodule, welche für den Betrieb der kooperativen Funktionen notwendig waren, aber zu fahrzeugspezifisch für die Entwicklung mit Hilfe einer Simulationsumgebung waren, wurden in diesem Arbeitspaket implementiert.

tiert. Die Umsetzung des IMAGinE-Konzepts konnte in Teilen durch die Integration der partnerspezifischen Komponenten erfolgen. Dafür war es den Partnern jeweils selbst überlassen, gemeinsame IMAGinE-Komponenten zu verwenden oder eigene Komponenten in das Fahrzeug oder den Simulator einzubringen. Zusätzlich wurde in diesem Arbeitspaket die Integration des Support-Servers vorgenommen und die Erweiterung des IMAGinE-Umfeldmodells mit den Daten aus dem zentralen Backend geprüft. Nach der Integration und Verifikation des partnerspezifischen Umfeldmodells wurden Messdaten aufgenommen, um die Arbeiten des GUA2 zu unterstützen. Im Anschluss wurde das kooperative Umfeldmodell aus AP3.1 mit Hilfe eines Simulators und in den Fahrzeugen in Betrieb genommen. Dafür fand eine Verknüpfung mit den ggf. vorhandenen partnerspezifischen Umfeldmodellen aus AP4.1 statt. Dieses kooperative Umfeldmodell wurde an die Versuchsfahrzeuge oder die jeweilige Simulationsumgebung angepasst und benötigt Adaptionen wurden vorgenommen. Als Hilfsmittel dienten Tests mit statischen Zielen in Sensorreichweite aber auch mit anderen funkenden Teilnehmern. Die Verifikation des IMAGinE-Umfeldmodells konnte zum Beispiel mit Testnachrichten eines Systems, welches unterschiedliche Fahrzeuge in der Umgebung per ITS-G5 simuliert, oder mit anderen ausgerüsteten Fahrzeugen vorgenommen werden.

Das kooperative Umfeldmodell war das Ergebnis des GUA2. Der Unterauftragnehmer hatte die Software nach den Vorgaben des Lastenheftes implementiert und getestet. Die Software wurde in dem vom IMAGinE-Konsortium bereitgestellten und genutzten git-Repository abgelegt. Da das Umfeldmodell in allen Fahrzeugen gleichermaßen laufen sollte, gab es genaue Hinweise für die Installation, die Bereitstellung von Karten und das Starten der Software. Voraussetzung für eine bestimmungsgemäße Funktion des kooperativen Umfeldmodells war eine korrekte Bedienung. Die Datenbereitstellung durch die Fahrzeuge war daher die Basis für das Umfeldmodell. Fahrzeugdaten, mit denen die CAMs und CPMs gefüllt worden sind, wurden gewissenhaft geprüft.

3.4.4.1 CPM-Integration

Die kollektive Perzeption diente im IMAGinE-System dazu, Umfeldinformationen zwischen Verkehrsteilnehmern auszutauschen. Dies sind Informationen über die wahrgenommene Fahrzeugumgebung eines Senders. Für diesen Zweck wurde die neu definierte Nachricht Collective Perception Message (CPM) in IMAGinE umgesetzt. In IMAGinE wurden CPMs nur von Fahrzeugen gesendet und nicht von Infrastrukturelementen. Inhaltlich wurden die Werte der CPM mit den bereitgestellten Objektlisten des IMAGinE-Umfeldmodells befüllt. Dies war die lokale Objektliste in den jeweiligen Fahrzeugen. Beim Empfang einer CPM wurden nach der Dekodierung die enthaltenen Objekte im IMAGinE-Umfeldmodell mit aufgenommen und fusioniert. Da in IMAGinE Versuchsfahrzeuge und Simulatoren aufgebaut worden sind, mussten die Daten der CPM in beiden Systemen bereitgestellt werden. Die Einbindung in die Versuchsfahrzeuge und die Einbindung in die Simulation erfolgte gleichermaßen. Die Werte, die das FGW der Fahrzeuge lieferte, entsprachen der Genauigkeit und des Verhaltens der Sensoren der Fahrzeuge. Schwan-

kungen oder Fehlmessungen waren daher vorhanden. Bei der Simulation wurden die Werte zunächst optimal erzeugt. In weiteren Verarbeitungsschritten wurden die Daten verrauscht und realistischer modelliert.

3.4.4.2 Überprüfung und Test des kooperativen Umfeldmodells

Schwerpunkt der Arbeiten im Arbeitspaket war die Überprüfung und der intensive Test des kooperativen Umfeldmodells. Da nicht alle Funktionalitäten bei den Partnern vor Ort getestet werden konnten, wurden mehrere Integrationsworkshops und bilaterale Treffen organisiert. Um die Software des kooperativen Umfeldmodells (UMF) intensiv zu testen und für die Anwendungsfälle entsprechend zu parametrieren, wurden verschiedene Werkzeuge genutzt. Diese waren Hilfsmittel, um die Kennwertaufnahme und das Vergleichen von Daten zu ermöglichen. Die wichtigsten Werkzeuge waren der Simulationsaufbau und die Umfeldvisualisierung. Mit Hilfe dieser Werkzeuge konnte sichergestellt werden, dass das partnerspezifische Umfeldmodell zusammen mit dem kooperativen IMAGinE-Umfeldmodell in Simulation und in den Fahrzeugen korrekt integriert und in Betrieb genommen werden konnte. Der Simulationsaufbau wurde als Unterstützung der Fahrzeugflotte bei den Workshops genutzt. Wenn auch die Kommunikationseinheit waveBEE an den Simulator angeschlossen war, konnten alle Fahrzeuge gleichzeitig visualisiert werden und definierte, reproduzierbare Nachrichteninhalte versendet werden. Mit dem Simulationsaufbau konnte ein weiteres Fahrzeug simuliert werden, welches Nachrichten live senden und empfangen konnte. Wenn mehrere Fahrzeuge in der Simulation genutzt wurden, konnten so Systemgrenzen mit vielen Kommunikationspartnern getestet werden. Für die Prüfung der Funktionalität des kooperativen Umfeldmodells waren verlässliche Ground-Truth-Daten sinnvoll, die durch die Simulation bereitgestellt wurden.

Die Umfeldvisualisierung war ein weiteres Tool, das bei Livetests im Fahrzeug besonders hilfreich war. Die Software wurde im Rahmen des gemeinsamen Unterauftrages entwickelt. Die Visualisierung wurde mit Fahrzeugdaten (Sensorobjekte, Position, etc.) und mit den empfangenen V2X-Nachrichten (CAM, CPM) gespeist. Weiterhin konnte eine Karte eingebunden werden, die die Straßen zur besseren Verortung zeigt. Die Objekte wurden in unterschiedlichen Farben in der Visualisierung dargestellt. Da das Umfeldmodell die Fusion der unterschiedlichen Quellen berechnet, wurden auch die resultierenden Fusionsobjekte sichtbar.

Um einen Überblick über die Datenstruktur und die Inhalte der Topics zu erhalten, war das Tool PlotJuggler zur Rosbag-Analyse nützlich. Das Tool ermöglicht das schnelle Einlesen und eine grafische Darstellung der Daten. So konnten in der Entwicklung effizient Rosbags ausgewertet werden.

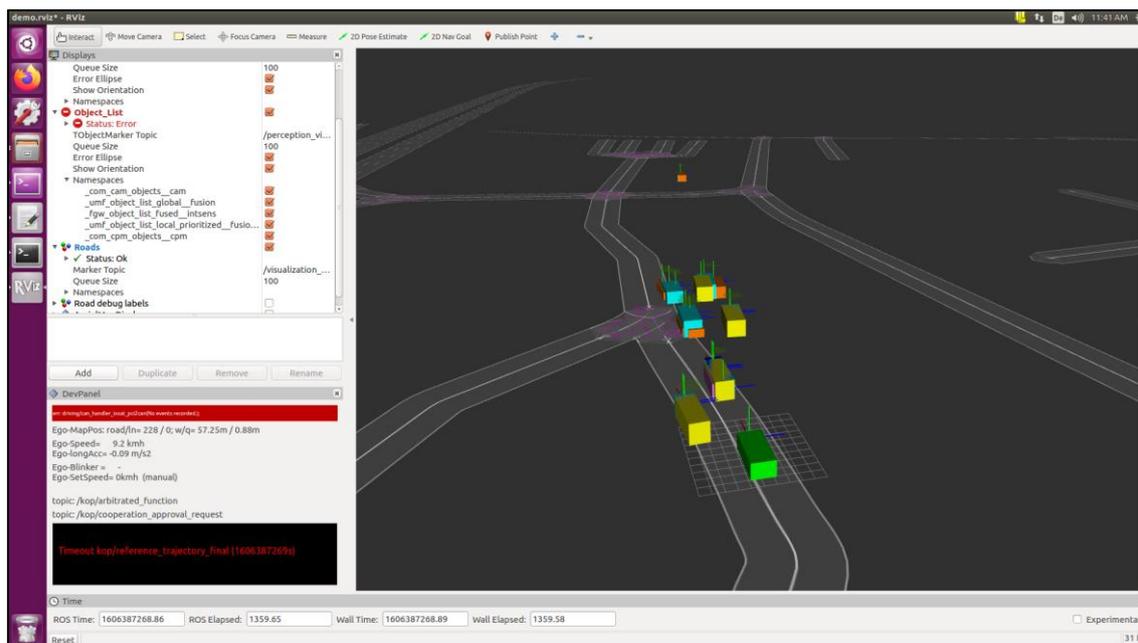


Abbildung 53: IMAGinE-Umfeldvisualisierungstool

Um die korrekte Funktionsweise des Systems zu gewährleisten, wurden trotz der schwierigen Lage während der Corona-Pandemie unterschiedliche Integrationsworkshops geplant und durchgeführt. In diesen Workshops wurden schrittweise einzelne Funktionalitäten integriert und getestet, um die partnerspezifischen Umfeldmodelle zusammen mit dem kooperativen IMAGinE-Umfeldmodell in Simulation und in den Fahrzeugen in Betrieb zu nehmen. Die Ziele der Workshops waren dabei hauptsächlich die Verifikation des kooperativen Umfeldmodells. Weiterhin galt es aber auch, Antennen und Reichweite zu prüfen und dabei Simulationsrechner zur Visualisierung der Fahrzeuge, zum Senden von Referenznachrichten sowie Fahrzeuge in realistischen Fahrkonstellationen zu nutzen. Um dieses Ziel zu erreichen, mussten alle beteiligten Komponenten verifiziert werden. Dies waren insbesondere die Bereitstellung aller relevanten Daten der Fahrzeuge über das FGW, das Testen des COM-Moduls der waveBEE und der Stackversion, das korrekte Senden und Empfangen von CPMs und CAMs, die Funktion des Map-Servers mit Karten und die genaue Ortung. Die Leistungsfähigkeit der Umfeldmodellsoftware wurde mit realistischen Fahrkonstellationen geprüft, insbesondere im Hinblick auf Einfädelassistenten und Querverkehr.

3.4.4.3 Einbindung des Umfeldmoduls

Das UMF-Modul wurde im gemeinsamen Unterauftrag erstellt. Zu dem Unterauftrag gehörte auch die Erstellung einer Rviz-Visualisierung für die CPM-Objekte. Um später Kooperationen in Fahrbahnbezugskoordinaten (Frenet-Koordinaten) zu planen, wurde im gemeinsamen Unterauftrag auch ein Kartenserver inklusive einer entsprechenden Rviz-Visualisierung erstellt. Sobald erste Versionen des UMF-Moduls verfügbar waren, wurden diese in den gemeinsamen Workshops in die Fahrzeugsysteme integriert. Die schon während der grundlegenden CPM-Integra-

tion benutzen und korrigierten Rohobjektdateien wurden dem UMF-Modul zur Verarbeitung gegeben und die vom UMF-Modul verarbeiteten Daten, d.h. fusionierten Objekte konnten dann als CPMs versendet werden. Mit den ersten Versionen der Rviz-basierten Umfeldobjekt-Visualisierung konnten zahlreiche Fahrmanöver durchgeführt werden. Iterativ wurden während und nach den Workshops in bewährter Methode mit Hilfe von aufgezeichneten ROSBags und Car-Maker-Simulationen das UMF-Modul, die Rviz-Visualisierung und von den einzelnen Partnern die Fahrzeugsysteme weiterentwickelt und stabilisiert. In den letzten in Frankfurt am DRiVE Center durchgeführten Versuchen wurden einige Kolonnenfahrten auf angrenzenden Bundesstraßen und Autobahnen durchgeführt, um die Funktionalität des UMF-Moduls auch bei realen Geschwindigkeiten und Umgebungen zu beurteilen.

Die folgenden Bilder aus den Integrationsworkshops zeigen Fahrscenarien, wie sie in der IMAGinE-Visualisierung dargestellt werden. Dargestellt sind die Objekte als Ergebnis der kooperativen Objektfusion aus dem gemeinsam Unterauftrag. Der grüne Block stellt das eigene Fahrzeug dar, die gelben Blöcke sind empfangene CAM-Nachrichten, dunkelblau sind die Objekte der Ego-Sensorik, orange sind die empfangenen CPMs und die hellblauen Boxen zeigen das Fusionsergebnis, welches vom UMF-Modul erzeugt worden ist.



Abbildung 54: Objektdarstellung in der IMAGinE-Visualisierung im Fahrzeug bei einer Testfahrt in Frankfurt



Abbildung 55: Objektdarstellung in der IMAGinE-Visualisierung im Fahrzeug bei einer Testfahrt in Pferdsfeld

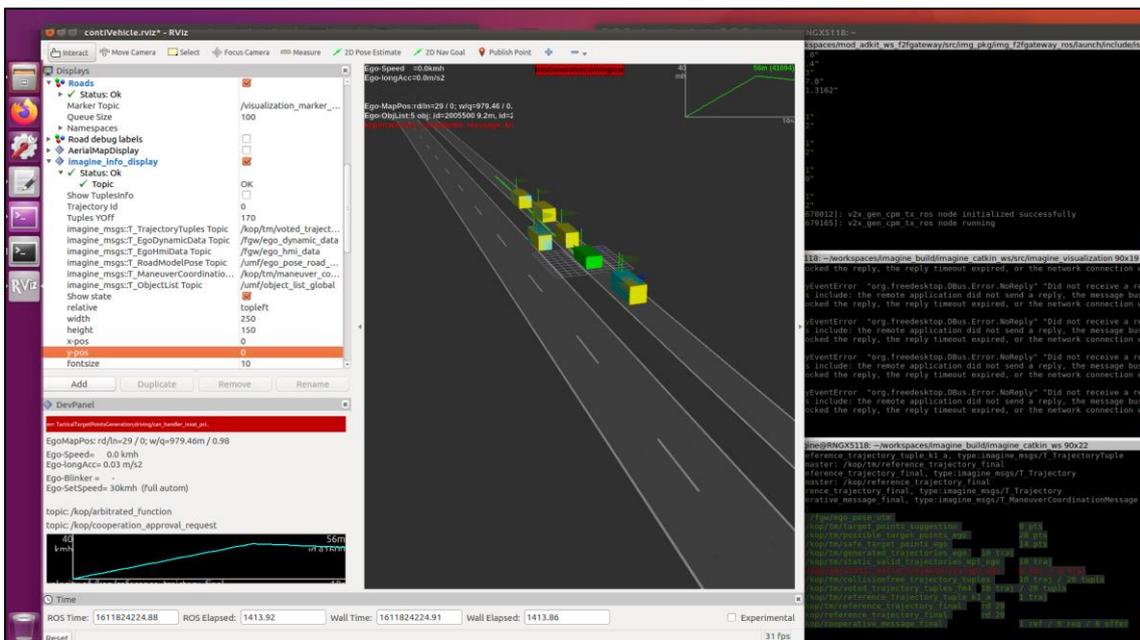


Abbildung 56: Objektdarstellung in der IMAGinE-Visualisierung beim Integrationsworkshop VII

3.4.5 AP4.4: Inbetriebnahme und Integration der kooperativen Funktionen

Ein wesentliches Ziel von AP4.4 hatte die Einbindung und Inbetriebnahme der verschiedenen kooperativen Manöverabstimmungskonzepte aus dem gemeinsam beauftragten Konzept zur kooperativen Manöverabstimmung und partnerspezifischer Ansätze auf dem Funktionsrechner im Fahrzeug und in den Simulatoren. Des Weiteren war das Ziel, die kooperative Manöverabstimmung in den Fahrzeugen oder Simulatoren evaluierbar zu machen. Der Fokus lag dabei auf der Integration der Funktionen, die durch partnerspezifische Eigenentwicklungen und in der gemeinsam beauftragten Software implementiert wurden. Folgende wesentliche Ergebnisse wurden gemäß der Zielsetzung im AP4.4 erarbeitet:

- Implementierung partnerspezifischer Funktionsanteile, insbesondere das Fahren von Trajektorien für kooperative Manöver
- Einbindung der kooperativen Funktionen in die Versuchsfahrzeuge oder Simulatoren
- Tests der kooperativen Funktionen im Fahrzeug über die drahtlosen Schnittstellen
- Partnerspezifische und gemeinsame Erprobung der kooperativen Manöver mit Versuchsfahrzeugen
- Testergebnisse für Deliverable D4.4 Fahrzeuginbetriebnahme kooperative Fahrmanöver

Das Arbeitspaket startete im April 2020 und endete Ende Dezember 2021 mit der Fertigstellung der Integration der Systemkomponenten in den Versuchsträgern und Simulatoren.

Im Folgenden werden nähere Details zu den Arbeiten des AP4.4 beschrieben.

Das Arbeitspaket umfasste im Rahmen des IMAGinE-Projekts sowohl die Vorbereitung der Fahrzeuge und Simulatoren für die Integration der kooperativen Fahrfunktionen in die Versuchsträger als auch die Integration der kooperativen Komponenten selbst. Basis der Implementierungen war die Referenzarchitektur, die im Rahmen von TP2 definiert wurde. Die einzelnen IMAGinE-Komponenten wurden eigenverantwortlich von den Projektpartnern in die Versuchsträger implementiert und in gemeinsamen Integrationsworkshops getestet und weiterentwickelt. Innerhalb der Integrationsworkshops wurde der aktuelle Stand der Umsetzung der Manöverabstimmung und der Funktionen der einzelnen Partner abgestimmt. Im Laufe des Arbeitspakets wurde die gemeinsam beauftragte Software zur kooperativen Manöverabstimmung sukzessive in die Fahrzeuge und Simulatoren integriert, weiterentwickelt und verbessert. Dabei lag der Fokus in den Fahrzeugen zunächst auf der Erweiterung und Verbesserung der aus der gemeinsamen Beauftragung erhaltenen Manöverplanungssoftware und der Integration der Funktionen F1, F4, F5 und F7. Im weiteren Verlauf des Arbeitspakets wurden auch die Funktionen F1-F7 gesamtheitlich in die Simulatoren sowohl mit der gemeinsam beauftragten Software als auch mit den partnerspezifischen Umsetzungen integriert.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Zuordnung der Funktionen auf die IMAGinE-Partner und deren Stand der Funktionsimplementierung am Ende des AP4.4:

Tabelle 10: Übersicht der Funktionen und der jeweils beteiligten Partner

Funktion	Partner	Fahrzeug/Simulator
F1 Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen	Autobahn des Bundes	Fahrzeugintegration
	Continental	Fahrzeugintegration und Simulation
	Bosch	Fahrzeugintegration und Simulation
	Opel	Fahrzeugintegration und Simulation
	Mercedes-Benz	Simulation
	Volkswagen	Simulation
	BMW	Simulation
F2 Kooperative Längsführung auf Autobahnen	MAN	Fahrzeugintegration und Simulation
	Mercedes	Simulation
F3 Kooperatives Überholen auf Landstraßen	Volkswagen	Simulation
F4 Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung	Autobahn des Bundes	Fahrzeugintegration, Roadside Station und Simulation
	Continental	Fahrzeugintegration
	Bosch	Fahrzeugintegration
	Opel	Fahrzeugintegration
F5 Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	Autobahn des Bundes	Fahrzeugintegration
	Continental	Fahrzeugintegration und Simulation
	Bosch	Fahrzeugintegration und Simulation
	Opel	Fahrzeugintegration und Simulation
F6 Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	MAN	Fahrzeugintegration und Simulation

Um die kooperativen Fahrfunktionen partnerspezifisch und über die verschiedenen Partner und Fahrzeuge hinweg zu testen, wurden wie oben bereits erwähnt sogenannte Integrationsworkshops durchgeführt. Die frühzeitige Erprobung des Gesamtsystems ermöglichte dem IMAGinE-Konsortium eine zeitnahe Untersuchung der kooperativen Manöverplanung im Zuge der Funktionsentwicklung. Im Laufe der AP4.4-Arbeiten konnte in den Integrationsworkshops sowohl mit der gemeinsam beauftragten Software als auch mit den partnerspezifischen Manöverabstimmungen eine Kooperation sowohl im Fahrzeug als auch in Simulation erfolgreich getestet und durchgeführt werden. Die partnerspezifischen Systemaufbauten und Prüfzenarien zum

Testen der Funktionen können den partnerspezifischen Abschlussberichten entnommen werden.

Die Inbetriebnahme der verschiedenen Manöverabstimmungskonzepte wurde (neben partnerspezifischen Erprobungen) gemeinsam in insgesamt 16 Fahrzeug-Integrationsworkshops und zwei Simulationsworkshops innerhalb des Konsortiums durchgeführt. Die Inhalte dieser gemeinsamen Workshops und deren grundlegende Ergebnisse werden im Folgenden in zeitlicher Abfolge der Versuchsfahrten detaillierter beschrieben. Dabei liegt der Fokus in AP4.4 auf der Integration der MCM, der kooperativen Manöverplanung und der Funktionen in die Versuchsträger.

3.4.5.1 MCM-Integration

Die MCM wurde zunächst mit festen Werten befüllt und damit die grundlegende Übertragung von Fahrzeug zu Fahrzeug getestet. Diese Tests fanden parallel zu den letzten Integrationsworkshops des UMF-Moduls statt. Etwas früher wurde der Kartenserver ins System eingebunden. Die in Rviz visualisierte Karte gab zusätzliche Orientierungspunkte, u.a. für die CPM-Objekte und deren Lokalisierung.

Die Karten wurden in CarMaker erstellt und über eine im Projekt entwickelte Exportschnittstelle im IMAGinE-Format ausgegeben. Diese IMAGinE-Karten wurden in den Fahrzeugen eingebunden. Mit der Verfügbarkeit der Karteninformation war es erstmals möglich, das im gemeinsamen Unterauftrag entwickelte Modul zur Manöverplanung in Betrieb zu nehmen.

Der Versand von geplanten Trajektorien und damit die vollständige Systemkette konnte in den letzten Workshops am DRIVE Center in Frankfurt am Main aufgebaut werden. Um die Funktion des KOP-Moduls für die geplanten Funktionen zu erproben war es notwendig, auf ein Testgelände zu wechseln, das mehr Platz bot.

Das folgende Bild aus dem Integrationsworkshop VI zeigt ein Fahrscenario, wie es in der IMAGinE-Visualisierung dargestellt wurde. Dargestellt sind sowohl die Trajektorienvisualisierung und die Objekte selbst als auch das Ergebnis der kooperativen Objektfusion. Der grüne Block stellt das eigene Fahrzeug dar, die gelben Blöcke sind empfangene CAM-Nachrichten und der blaue ist das Fusionsergebnis, welches vom UMF-Modul erzeugt worden ist. Der Trajektorienplaner generierte in diesem Stadium bereits fahrbare Trajektorien und versendete diese per MCM an die anderen Fahrzeuge.

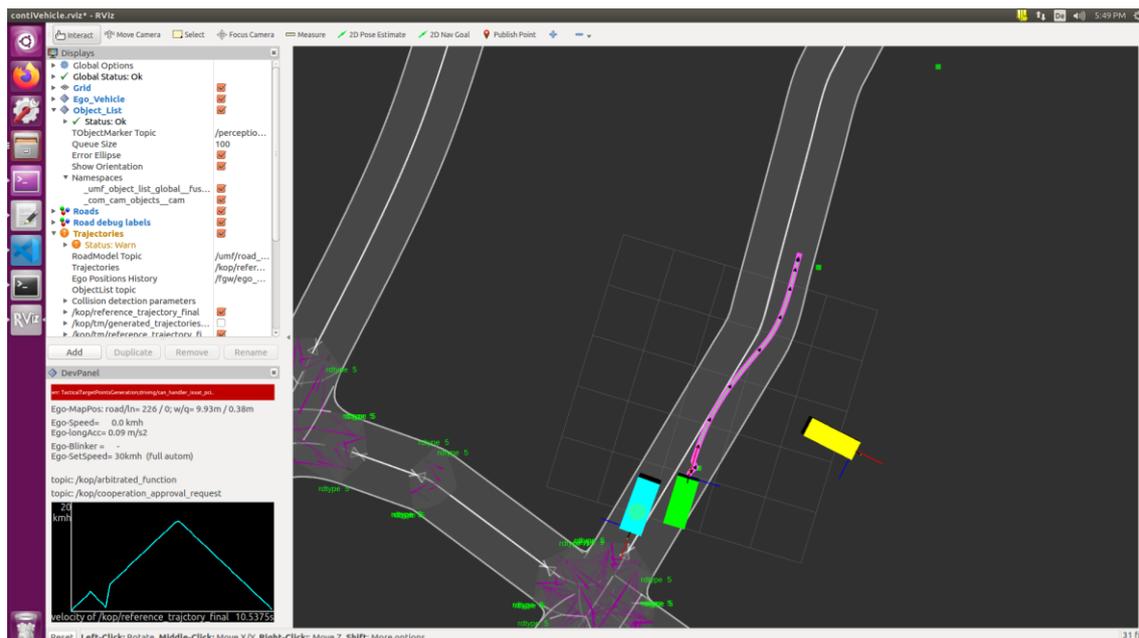


Abbildung 57: Trajektorienvisualisierung in der IMAGinE-Visualisierung beim Integrationsworkshop VI

3.4.5.2 Kooperative Manöverplanung (KOP-Modul)

Die Software zur kooperativen Manöverplanung und -abstimmung, die in den meisten Fahrzeugen verwendet wurde, basiert auf der im gemeinsamen Unterauftrag entwickelten Software. Die ersten Tests fanden ab November 2020 am DRIVE-Center statt. Schon früh zeigte sich, dass - wie nicht anders zu erwarten - die Software in der Realität vor Probleme gestellt wurde, die in der Simulation nicht betrachtet wurden. Insbesondere ist hier die Echtzeitfähigkeit und die (Absturz-)Stabilität in nicht-spezifikationsgemäßen Situationen zu nennen. Die Ergebnisse flossen teilweise in den Entwicklungszweig zurück. Aufgrund von divergierenden Zielsetzungen zwischen dem Auftragnehmer und den Anforderungen aus den Fahrzeugen wurde vom Projektpartner Continental allerdings früh ein eigener Entwicklungszweig aufgesetzt, der fortan in den Fahrzeugen für gemeinsame Tests verwendet wurde.

Für erste Tests der Autopilot-Funktion wurde ab 01/2021 die Teststrecke in Griesheim genutzt. Hier wurden Funktionalitäten wie „Dem-Fahrstreifen-folgen“, „Geschwindigkeit-einhalten“ und „anderen-Fahrzeugen-folgen“ getestet. Außerdem fanden ab Anfang 2021 erste Tests für das Einfädeln auf Autobahnen (F1) statt, die aus Softwaresicht damals noch eine Erweiterung des Autopiloten darstellte. Hier zeigten sich weitere Probleme, die im praktischen Fahrbetrieb neu auftraten:

- Alle Fahrzeuge auf der Strecke, inkl. parkende, im Umkreis der Funkreichweite (500 m) wurden vom KOP-Modul mitberücksichtigt, was zu Rechnerüberlastung führte
- Fahren abseits der Kartenstrecke, entgegen der Fahrriichtung oder rückwärts führte zu Abstürzen/Problemen

- Zu lange Straßen führten zu Kodierungsproblemen bei der MCM
- Es gab viele Situation, in denen keine Trajektorien erzeugt wurden, u.a. aufgrund von Problemen in der Kollisionsdetektion

Diese Fehler wurden im Laufe der folgenden Workshops beseitigt.

Eine weitere Herausforderung war die Choreografie-Abstimmung für Fahrsituationen, aus denen eine Kooperation sinnvoll und möglichst reproduzierbar entstehen konnte. Hierzu mussten passende Geschwindigkeitsprofile für die beteiligten Fahrzeuge ermittelt werden. Dazu gehörte ein passender Startort und -zeitpunkt, der das Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge mitein-schloss. Anfangs wurde mit Landmarken gearbeitet, an denen ein Fahrzeug auf der Hauptfahrbahn vorbeikommen musste, bevor das einfädelnde Fahrzeug starten durfte. Vorteil war, dass aus stabilen Fahrsituationen heraus eine Kooperation gut reproduzierbar aufgebaut und dann leichter im Fahrzeug beobachtet werden konnte.

Der Bedarf, im bewegten Fahrzeug während der Manöverdurchführung beurteilen zu können, ob eine Kooperation aufgebaut und dann ggf. durchgeführt wurde, stellte neue Anforderungen an das HMI und die Visualisierung interner Größen. Es wurden aus dem gemeinsamen Unterauftrag vorhandene Komponenten erweitert und - da dies noch nicht reichte - neue entwickelt.

Als kritisch stellte sich die Ausgabe der Objektfusion heraus, die parallel entwickelt wurde. Anfangs wurden hier lokale Sensordaten, fremde Sensordaten per CPM und Daten aus CAMs zusammen fusioniert und alles dem KOP-Modul als Eingangsdaten übergeben. Leider war die Qualität sowohl der lokalen Daten, aber insbesondere auch die der fusionierten fremden Sensordaten zu stark fehlerbehaftet. Dies äußerte sich in Positionierungsfehlern von mehr als einer Fahrstreifenbreite, nichtexistierenden Objekten, mehrere Objekte dicht neben- oder sogar teilweise übereinander - letzteres auch für das Ego-Fahrzeug. Für diese Datenfehler war die Implementierung des KOP-Moduls nicht ausgelegt, die zudem generell nicht mit viel mehr als drei anderen Objekten zurechtkam. Um die Inbetriebnahme sinnvoll fortsetzen zu können, wurden daher vorläufig nur Objekte, die auf CAM-Daten basieren, für die Manöverplanung verwendet. Diese erwiesen sich in allen relevanten Situationen als ausreichend stabil - sofern das sendende Fahrzeug über eine fahrstreifengenaue Ortung verfügte. Eine genaue Ortung ist immanent wichtig für die Manöverplanung. Als Mindestanforderung war in den Versuchen die halbe Fahrstreifenbreite zu sehen. Anderenfalls wurden entweder erst gar keine Trajektorien geplant oder Fahrzeuge wurden auf den falschen Fahrstreifen zugeordnet, was zu entsprechend falschen Trajektorien und Situationsanalysen führte.

Ab Mai 2021 fanden in Griesheim die ersten Inbetriebnahme-Tests zum Linksabbieger-Szenario (Funktion F5) statt. Auch hier war es die erste Aufgabe, eine passende Choreografie zu ermitteln, damit sich eine Kooperation aufbauen konnte. Die Ergebnisse wurden genutzt, um die Parametrisierung des KOP-Moduls zu adaptieren.

Es stellte sich heraus, dass die bisherige Implementierung des KOP-Moduls ungeeignet war, um den Anforderungen des Linksabbiegerszenarios gerecht zu werden. Weder für das Fahrzeug, noch später in der Simulation ließen sich ausreichend stabile Trajektorien konfigurieren. Im

Linksabbieger-Fall wurden verhältnismäßig komplexe Trajektorie benötigt („Bremsen vor einer Kurve mit anschließendem Beschleunigen“). Um diese zu erhalten, hätte die Gesamtzahl berechneter Trajektorien so hoch eingestellt werden müssen, dass es in Echtzeit nicht rechenbar gewesen wäre - von der Berücksichtigung andere Fahrzeuge mit der entsprechenden Kombinatorik ganz abgesehen. Daher wurde vom Projektpartner Continental für die Funktion F5 die Trajektorienberechnung so geändert, dass passendere Trajektorien ohne Erhöhung des Rechenaufwandes erstellt wurden. Mitte 2021 wurde diese Version auf dem TRIWO-Testgelände in Pferdfeld (<https://www.triwo-testcenter.de/>) zum ersten Mal getestet und lieferte erfolgsversprechende Ergebnisse.

Die folgenden Tests fanden ausschließlich auf diesem Testgelände statt. Der für das Testen des Linksabbiegers benutzte Bereich weist auf der rechten Seite einen Hügel auf, der die Funk-Reichweite zwischen dem abbiegenden Fahrzeug und dem von rechts kommendem Fahrzeug so weit begrenzte, dass sich die Fahrzeuge an der Startposition nicht gegenseitig empfangen können. Dies erschwerte die Tests der Kooperativen Manöverplanung, da sich dadurch die Zeit reduzierte, in der kooperationsgewährende Fahrzeuge Lücken schaffen konnten. Die Nutzung eines V2X-Repeater behob dieses Manko.

Aufgrund der veränderten Gegebenheiten wurde die fahrzeugübergreifende Synchronisierung der Manöver auf ein zentrales Kommando eines Mitfahrers in einer parallel laufenden Telefonkonferenz geändert. Um dabei den Einfluss der spürbaren Kommunikationsverzögerung zu verringern, wurde das Kommando immer von dem gleichen Fahrzeug, z.B. immer der Einfädler, gegeben. Auf dieses Kommando hin, sind alle beteiligten Fahrzeuge gleichzeitig losgefahren. Variationen für die zu schaffende Situation konnten dabei über die Modifikation der Startposition geschaffen werden.

Schwierig war dabei, dass das Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge nicht identisch war - insbesondere auch das der nicht automatisiert fahrenden Fahrzeuge. Somit ergab sich eine gewisse Streuung, wann Fahrzeuge die Kooperationszone erreichten und entsprechend war es schwierig, bestimmte Grenzfälle in der Kooperation zu evaluieren oder zu reproduzieren.

Um die unvermeidlichen Streuungen zu reduzieren, wurde ein neues HMI-Plugin entwickelt, das in einem Ego-Fahrzeug die dynamische Position eines definierten anderen Fahrzeuges auswertet und daraus einen Start-Countdown generierte, anhand dessen der Fahrer eine exaktere Vorgabe zum Beginn seines eigenen Manövers hatte.

Zum einen die implementierte Manöverplanung, aber vor allem auch die äußerliche Choreografie der Szenarien, stützten sich zu einem wichtigen Teil auf die im statischen Road-Model hinterlegten Informationen. Die dazu benötigten Karten wurden anhand von GPS-Traces im Tool CarMaker als .rd5-Dateien erstellt und dann durch den 'imagine_map_server' in das interne Format kopiert. Durch aufgebraachte Patches konnten nachträglich noch Informationen für den jeweiligen Zweck adaptiert werden. Zum Beispiel wurde für den Einfädler eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h auf der Zufahrt eingebaut, die in der Realität nicht vorhandene

gekrümmte Zufahrt mit ihrer geringen möglichen Geschwindigkeit simulierte. Somit wurden realistischere Möglichkeiten für das Testen der Funktion F1 geschaffen. Es wurden ebenfalls verschiedene Varianten für die Funktion F4 (Verkehrsverteilung) eruiert, die sich neben den Tests später auch gut als Präsentationsszenarien eignen konnten.

Die ersten Tests im Jahr 2021 dienten dazu, generell festzustellen, ob Fahrzeuge auch in der Realität miteinander kooperieren konnten. Dies wurde parallel für die F1 und die F5 getestet. Dazu wurden permanent sowohl manuell gesteuerte Fahrzeuge als auch automatisiert gesteuerte Fahrzeuge verwendet. Die Ergebnisse flossen in die Softwareentwicklung zurück.

Mit steigender Qualität ab Mitte/Ende 2021 konnten systematische Versuche unternommen werden, um die Grenzen, bei denen Kooperation stattfand, gerade noch stattfand oder nicht stattfand, zu ermitteln. Bei den Inbetriebnahme-Tests wurden typischerweise - nachdem die generelle Funktionstüchtigkeit der Fahrzeuge sichergestellt war - bei jeder neuen Softwareversion diese Grenzen ermittelt. Denn sie hängen u.a. von der Parametrisierung der Manöverplanung, aber auch von funktionalen Weiterentwicklungen, ab. Somit mussten diese Grenzen bei jedem Workshop neu erprobt werden.

Manöverplanung und Kooperation wurden mit diversen Manövern getestet:

- F1: Zwei Fahrzeuge: Ein Einfädler, ein Fahrzeug auf der Hauptfahrbahn
- F1: Drei Fahrzeuge: Ein Einfädler, zwei Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn. Der Einfädler kann vor beiden, dazwischen oder dahinter einfädeln.
- F1: Vier Fahrzeuge: Ein Einfädler, zwei Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn, eines auf der linken Überholspur. Der Einfädler sollte hinter dem ersten einfädeln. Das zweite Fahrzeug sollte durch einen Spurwechsel Platz machen und dazu mit dem letzten Fahrzeug kooperieren.
- F5: Zwei Fahrzeuge: der Linksabbieger und ein Fahrzeug von links
- F5: Zwei Fahrzeuge: der Linksabbieger und ein Fahrzeug von rechts
- F5: Drei Fahrzeuge: der Linksabbieger und je ein Fahrzeug von links und rechts
- F5: Drei Fahrzeuge: der Linksabbieger und zwei Fahrzeuge von links
- F4: Zwei Fahrzeuge, welche der Verkehrsverteilung folgen

Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen Ausschnitte aus der Manöverplanungsalgorithmik und den Testfahrten zur Funktion F4.

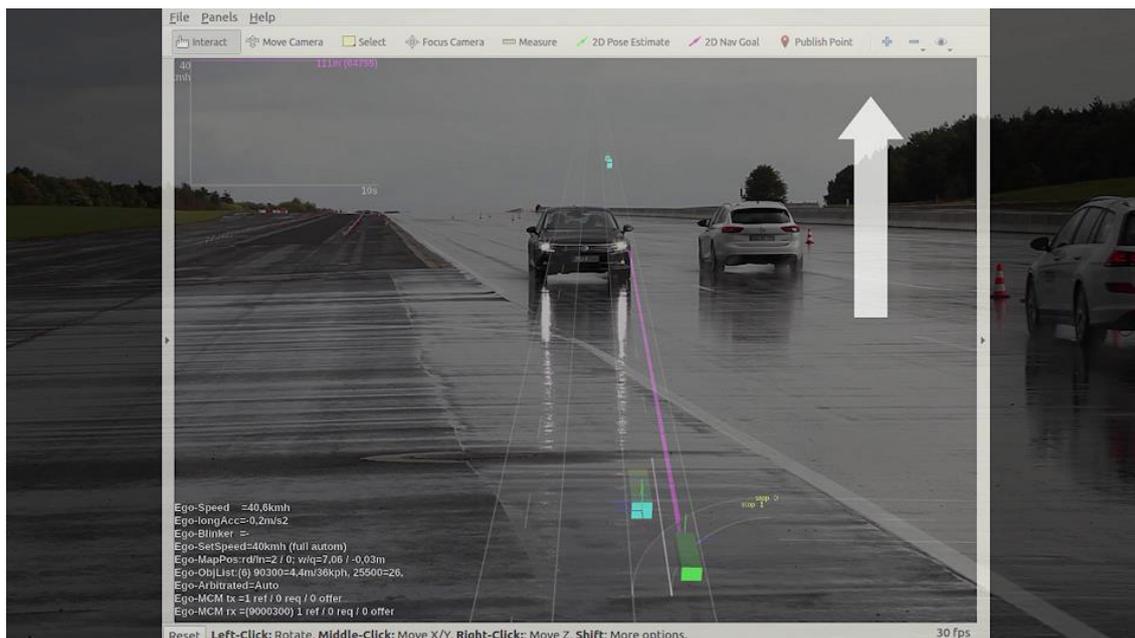


Abbildung 58: Manöverplanungsalgorithmen am Beispiel F5



Abbildung 59: Sicht aus Ego-Fahrzeug bei Fahrversuchen zur Funktion F1

Die Sollgeschwindigkeit war bei F1 typischerweise 60km/h, bei F5 40 km/h. Es wurden auch andere Geschwindigkeiten getestet, aber diese erwiesen sich als guter Kompromiss zwischen einem realistischen Szenario auf der einen und Platzbedarf und Sicherheit auf der anderen Seite.

Ab Ende 2021 / Anfang 2022 war die Software so weit entwickelt, dass verschiedene Konfigurationen für unterschiedlich kooperatives Verhalten (z.B. „sehr kooperativ“ vs. „normal kooperativ“) erstellt werden konnten.

Für jeden Integrations- und Simulationsworkshop wurden im Vorfeld neben der Anzahl und dem Softwarestand der Fahrzeuge und Simulatoren, Kartendaten, Grundeinstellungen für die Visualisierung, Workshopziele und Testszenarien über alle teilnehmenden Partner abgestimmt. Die Durchführung der Testfahrten erfolgte anhand der in IMAGinE definierten kooperativen Fahrfunktionen und Szenarien. Die einzelnen Testfahrten wurden detailliert dokumentiert, mit Screenshots und Bildern versehen und in ROSBags gespeichert. Die Testinhalte gliederten sich in vier Kategorien, die in der folgenden Tabelle dargestellt werden:

Tabelle 11: Übergeordnete Testinhalte der Integrationstests

Kategorie	Beschreibung
KOP	<ul style="list-style-type: none"> • Einbindung KOP in das Fahrzeug <ul style="list-style-type: none"> • Darstellung der Trajektorien in einer Visualisierung • Einbetten der GUA1-Manöverplanung in das vom GUA2/lokale Fusion/CarMaker gefütterte Gesamtsystem • Darstellung einer Spurhaltefahrt (F7) in Simulation • Darstellung einer Spurhaltefahrt (nur Anzeige des Ergebnisses) im Fahrzeug
Vehicle in the Loop (Simulation)	<ul style="list-style-type: none"> • Objekte aus der Simulation nutzen im Auto, um die Ego-Daten zu überschreiben
Performance-messungen	<ul style="list-style-type: none"> • Messungen bei allen Partnern aufgezeichnet, wenn UMF und KOP laufen
ROSBags	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme der Szenarien mit dem jeweiligen Firmen Kürzel und Szenario. Ablage erfolgt auf sFTP-Server, der von Bosch bereitgestellt wird.

3.4.5.3 Ergebnisse

Die Ziele des Arbeitspaketes, die Einbindung und Inbetriebnahme der verschiedenen kooperativen Manöverabstimmungskonzepte aus dem gemeinsam beauftragten Konzept zur kooperativen Manöverabstimmung und partnerspezifische Ansätze auf dem Funktionsrechner im Fahrzeug und in den Simulatoren wurden erreicht. Die Funktionsreife der Funktionen war zum Ende des Projekts robust genug, um in einer Fahrzeugdemonstration präsentiert zu werden und die im IMAGinE-Projekt definierten Untersuchungsgegenstände mit dem aktuellen Software-Stand bearbeiten zu können. Im Laufe der AP4.4-Arbeiten konnte in den Integrationsworkshops sowohl mit der gemeinsam beauftragten Software als auch mit den partnerspezifischen Manöverabstimmungen eine Kooperation sowohl im Fahrzeug als auch in Simulation erfolgreich getestet und durchgeführt werden.

3.4.6 Zielerreichung

Die Zielerreichung wird aufgeteilt in zwei unterschiedliche Pfade. Zum einen ist es die Integration kooperativer Manöverfunktionen in Simulatoren und zum anderen in den Aufbau und die Integration in Fahrzeuge.

Die Integration der kooperativen Funktionen in Simulation gliedert sich auf eine Vielzahl Abstimmungsansätze und Simulationsumgebungen auf.

- Alle sechs Funktionen wurden von Partnern in Simulation umgesetzt.
- Es wurden unterschiedliche Manöverplanungsalgorithmen (Opel, MAN, Bosch, BMW, Mercedes-Benz, Continental und Volkswagen) zur Umsetzung der Manöverabstimmung für die unterschiedlichen Konzepte umgesetzt.
- Simulatoren wurden mit Hilfe von Funk-Hardware ermächtigt, reale Funkbotschaften von simulierten Fahrzeugen zu erzeugen und somit Testfälle zu stimulieren.
- Das kooperative Umfeldmodell wurde mit Hilfe der Simulation entwickelt.

Es wurden 12 kooperative Fahrzeuge aufgebaut.

- Die Funktionen F1, F4 und F5 konnten in 10 Fahrzeugen miteinander und mit beliebig gemischten Partnerkonstellationen gezeigt werden.
- Zwei Lkws konnten die Funktionen F2 und F6 darstellen.
- Fünf dieser Fahrzeuge konnten automatisiert die Manöver fahren.
- In den 10 Pkws wurde das IMAGinE-System verbaut und damit dem jeweiligen Fahrzeug Kooperationsfähigkeit verliehen.
- Die Fahrzeuge hatten somit eine kooperative Manöverplanung.
- Die Fahrzeuge nutzten ein kooperatives Umfeldmodell als Basis, um die kooperative Manöverplanung durchzuführen.
- Diese Funktionen in den Fahrzeugen standen für die Aktivitäten rund um TP5 bereit.

Um diese Ergebnisse zu erreichen, vor allem mit Blick auf die Interoperabilität, wurden 16 gemeinsame Workshops durchgeführt. Diese sind AP-übergreifend durchgeführt worden und in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 12: Liste der Integrations- und Simulationsworkshops im Rahmen von TP4

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
Integrationsworkshop I-III	2019 Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement (Alte) Verkehrszentrale Hessen - DRIVE Center	<ul style="list-style-type: none"> • Testen des COM-Moduls der waveBEE mit 10 Fahrzeugen und 2 Simulatoren • Zeitsynchronisation und Zeiten zwischen den Fahrzeugen abgleichen • Ortung testen mit allen Fahrzeugen • Simulationsrechner als Visualisierung der Fahrzeuge und zum Senden von Referenznachrichten (CAM und ggf. CPM) nutzen • CAM-Tests: Prüfen, ob jedes Feld der CAM gefüllt ist und der Spezifikation entspricht • CPM-Tests: Setzen der Werte (Objektdaten/-liste)
Integrationsworkshop IV	16.-17.03.2020 Online	<ul style="list-style-type: none"> • Testen des aktuellen COM-Moduls der waveBEE und der Stackversion mit 10 Fahrzeugen und 2 Simulatoren • Simulationsrechner als Visualisierung der Fahrzeuge und zum Senden von Referenznachrichten (CAM und CPM) nutzen • Geoserver-Tests: Versand und Empfang von Nachrichten über Mobilfunk mit der waveBEE mit neuem Softwaremodul (GeoserverClient) • CPM senden / empfangen • Fahrzeuge müssen über FGW Umfeldmodelldaten bereitstellen können (inkl. Signalfeld Referenzvehicle) • ROSBags für GUAs zum Testen der Fusion • Zeitsynchronisierung testen
Integrationsworkshop V	23.-24.09.2020 Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Simulationsrechner als Visualisierung der Fahrzeuge und zum Senden von Referenznachrichten (CAM und CPM) nutzen • CPM komplett senden / empfangen (Fahrzeuge stellen über FGW Umfeldmodelldaten bereit (inkl. Referenzvehicle, Objektliste und Kovarianzen))

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
	(Alte) Verkehrszentrale Hessen - DRIVE Center	<ul style="list-style-type: none"> • Testen der GUA2-Ergebnisse mit 8 Fahrzeugen und 3 Simulatoren <ul style="list-style-type: none"> • ROSBags aufnehmen • Kovarianzen prüfen • Performance prüfen (HTOP) auch mit mehreren Fahrzeugen • Kartendarstellung • Fusionsergebnis auswerten • Realistische Fahrkonstellationen (Einfädelassistentz, Querverkehr) nutzen <ul style="list-style-type: none"> • F1 - Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen <ul style="list-style-type: none"> • 2 IMAGinE-Fahrzeuge und ein Hasenfahrzeug → Einfädeln auf Autobahn ○ F5 - Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 IMAGinE-Fahrzeuge → Rechtsabbiegerszenario ○ Kolonne fahren auf der Autobahn mit „hohen“ Geschwindigkeiten (100 km/h) ○ Weitere fusionsrelevante Manöver <ul style="list-style-type: none"> ▪ Parallelfahrt ▪ Folgefahrt ▪ Kurven ▪ Entgegenkommen ▪ Verdeckungen (Pkw - Lkw - Pkw) • Geoserver testen (Zeitstempel) • Testen der GUA1-Ergebnisse (KOP) • Antennen und Reichweite prüfen
Integrationsworkshop VI	25.-26.11.2020	<ul style="list-style-type: none"> • Mit 5 Fahrzeugen und 2 Simulatoren UMF testen mit letztem Stand und optimale Parametrierung finden

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
	Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement (Alte) Verkehrszentrale Hessen - DRIVE Center	<ul style="list-style-type: none"> • Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • Erste Tests der Trajektorien (Plausibilität, Output KOP, Übertragung mit waveBEE möglich wegen MCM-Größe) • Performance und Synchronität • Realistische Fahrkonstellationen (Einfädelassistentz, Querverkehr) nutzen <ul style="list-style-type: none"> • F1 - Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen <ul style="list-style-type: none"> ○ 2 IMAGinE-Fahrzeuge und ein Hasenfahrzeug • F5 - Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen <ul style="list-style-type: none"> ○ 2 IMAGinE-Fahrzeuge → Rechtsabbiegerszenario • Kolonne fahren auf der Autobahn mit „hohen“ Geschwindigkeiten (100 km/h) • Weitere fusionsrelevante Manöver <ul style="list-style-type: none"> ○ Parallelfahrt ○ Folgefahrt ○ Kurven ○ Entgegenkommen ○ Verdeckungen (Pkw - Lkw - Pkw)
Integrationsworkshop VII	27.-28.01.2021 Flughafen Griesheim	<ul style="list-style-type: none"> • Tests mit 5 Fahrzeugen • Verbesserungen UMF testen (FGW-Anpassungen, Parameter, etc.) • Ergebnisse aus AP3.1 testen (Filtern von Objektlisten) • KOP-Software, Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • Tests der Trajektorien (Plausibilität, Output KOP, Übertragung mit waveBEE möglich wegen MCM-Größe) • F1-Funktionalität auf Basis von F7 • Performance und Synchronität

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
		<ul style="list-style-type: none"> • Einigung auf Farben für die Trajektorienanzeige in der IMAGinE-Visualisation
Integrationsworkshop VIII	23.-25.03.2021 Flughafen Griesheim	<ul style="list-style-type: none"> • Tests mit 5 Fahrzeugen • Tests mit den Branches: Conti-Banches und CGE-Lieferung MS5 • Ergebnisse aus AP3.1 testen (Filtern von Objektlisten) • KOP-Software, Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • Tests der Trajektorien (Plausibilität, Output KOP, Übertragung mit waveBEE möglich wegen MCM-Größe) • F1-Funktionalität mit der F1 testen und nicht mit der F7, ohne Bedarfstrajektorien • Erste Tests mit der F5 • Performance und Synchronität
Integrationsworkshop IX	04.-05.05.2021 Flughafen Griesheim	<ul style="list-style-type: none"> • Tests mit 5 Fahrzeugen • KOP-Software, Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • Tests der Trajektorien (Plausibilität, Output KOP, Übertragung mit waveBEE möglich wegen MCM-Größe) • F1-Funktionalität mit der F7 testen • Tests mit der F5 und Aufnahme von verschiedenen Szenarien
Integrationsworkshop X	20.-21.07.2021 TRIWO-Testcenter Pferdsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme mit 5 Fahrzeugen • Karte auf neuem Testgelände in Pferdsfeld testen • Bereiche für F1 und F5 festlegen und Testfahrten, Szenarien, Choreographie • Grundfunktionen wie Ortung und Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • F1-Funktionalität mit der F7 testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien • F5-Funktionalität testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
		<ul style="list-style-type: none"> • Performance des Systems prüfen
Integrationsworkshop XI	21.-22.09.2021 TRIWO-Testcenter Pferdsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme mit 8 Fahrzeugen • Angepasste Karte in Pferdsfeld testen • Grundfunktionen wie Ortung und Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • F1 Funktionalität mit der F7 testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien • F5 Funktionalität testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien • Simulation ViL • Kommunikation Simulation <-> Fahrzeuge • Performance (Rechenleistung aufgrund mehrerer Teilnehmer, bzw. verstärkte Nachrichtenlast) • Abschlusspräsentation: Bereiche für Präsentationen, Testfahrten, Szenarien, Choreographie, usw. prüfen
Integrationsworkshop XII	05.-06.10.2021 TRIWO-Testcenter Pferdsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme mit 8 Fahrzeugen • Angepasste Karte in Pferdsfeld testen • Grundfunktionen wie Ortung und Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • F1-Funktionalität mit der F7 testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien • F5-Funktionalität testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien zu klären: Wird F1 jetzt mit dedizierter F1-Implementierung gefahren? • Simulation ViL • Kommunikation Simulation <-> Fahrzeuge • Performance (Rechenleistung aufgrund mehrerer Teilnehmer, bzw. verstärkte Nachrichtenlast (evtl. innerhalb von ROS))

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
		<ul style="list-style-type: none"> • HTOP • ROS-Tool zur Performance-Messung
Integrations-workshop XIII	02.-03.11.2021 TRIWO-Testcenter Pferdsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme mit 8 Fahrzeugen • Angepasste Karte in Pferdsfeld testen • Grundfunktionen wie Ortung und Signalkette prüfen mit COM-Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • F1-Funktionalität mit der F7 testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien • F5-Funktionalität testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien • Simulation ViL • Kommunikation Simulation <-> Fahrzeuge • Performance (Rechenleistung aufgrund mehrerer Teilnehmer bzw. verstärkte Nachrichtenlast) • Abschlusspräsentation: Bereiche für Präsentationen, Testfahrten, Szenarien, Choreographie, ... prüfen
Integrations-workshop XIV	23.-24.11.2021 TRIWO-Testcenter Pferdsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme mit 9 Fahrzeugen • Bosch: F1 mit zwei Bosch-Fahrzeugen • Continental: Funktionsverifikation F1 und F5, Regleranpassungen • Die Autobahn: Testen der F4 mit der neuen Karte und zweitem Fahrzeug • Opel: F1, F5, HMI, Trajektorienestimator, allgemeine Systemstabilität • Sensorgenauigkeitstests mit Folgefahrt: ein Fahrzeug fährt hinter einem Sensorhasen hinterher, Vergleich der CAM von dem Sensorhasen mit der sensorbasierten Objekterkennung über einen Entfernungsbereich von 20-300 m. • Abschlusszenario versuchen als Kombination mit F1 und F5 mit verschiedenen Rollen

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
Integrationsworkshop XV	15.12.2021 TRIWO-Testcenter Pferdsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme mit 9 Fahrzeugen • Angepasste Karte in Pferdsfeld testen (inkl. F4) • Grundfunktionen wie Ortung und Signalkette prüfen mit COM Modul, UMF und KOP (CPM, MCM, Trajektorien) • F1-Funktionalität testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien (Manuell, Automatisiert, Gemischt) • F5-Funktionalität testen und Aufnahme von verschiedenen Szenarien (Manuell, Automatisiert, Gemischt) • Simulation ViL • Kommunikation Simulation <-> Fahrzeuge • Performance (Rechenleistung aufgrund mehrerer Teilnehmer, bzw. verstärkte Nachrichtenlast) • CPM-Tests aller Opel-Fzg. (Prüfen, ob gleicher Kamera-Offset bei allen Fahrzeugen vorhanden ist)
Integrationsworkshop XVI	12.-13.01.2022 TRIWO-Testcenter Pferdsfeld	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme mit 9 Fahrzeugen • Vorbereitung Abschlussdemonstration: <ul style="list-style-type: none"> • Abschlusszenario als Kombination mit F1, F4 und F5 mit verschiedenen Rollen testen • Testen: F1, F5 • Untersuchungsgegenstände, Parametrierung der Funktionen • Verschiedene Szenarien erfahren: Start vom Shelter und Start vom Tower • Prüfen, wie man eine Online-Veranstaltung und vor Ort mit weniger Leuten realisieren kann. Fahrdemo ggf. mit weniger Leuten. Online und Pferdsfeld an verschiedenen Tagen

Testfahrt	Datum und Ort	Fokus und Ergebnisse
		<ul style="list-style-type: none"> • Performance-Tests durchführen und Überlast prüfen (KOP Analysis Modul) → Softwareupdate von Continental eingestellt • Fahrbahnmarkierung diskutieren und testen (Mobil von der Rolle?)
Simulationsworkshop I (Task Force zur Inbetriebnahme GUA1-F1 in Simulation)	27.04.2021	<ul style="list-style-type: none"> • Vorbereitung zur Arbeit mit GUA1-Manöverplaner und CarMaker. • Vortrag über den GUA1-Manöverplaner. • Darstellung der Schnittstellen anhand der Architektur und der Schnittstellenbeschreibung.
Simulationsworkshop II (GUA1-Workshop)	25.05.2021	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz der IMAGinE-Simulation • Umgang mit Werkzeugen zur Evaluation • Kostenfunktionen und sonstige Parameter • Konfiguration für eine erfolgreiche Kooperation • Übersicht der wichtigsten Schritte • Live-Debugging • Interpretation des Verhaltens des KOP-Moduls

3.5 TP5: Evaluierung und Erprobung

Zielsetzung

Zu den Aktivitäten von Teilprojekt 5 gehörten die Untersuchung der Funktionalität der entwickelten Technologien und Funktionen sowie die damit verbundene Ableitung von Optimierungsbedarf für die Weiterentwicklung der Systeme, die Betrachtung der Auswirkungen der Funktionen, insbesondere im Hinblick auf die Verkehrssicherheit und -effizienz, sowie die abschließende Demonstration des Systems im Fahrzeug und in der Simulation.

In der VHB 3.1 waren die Teilziele von TP5 wie folgt definiert:

- Evaluation von Algorithmen, Architektur, Kommunikationsmechanismen zur Umsetzung der Funktionen zur kooperativen Manöver Assistenz
- Evaluation der Mensch-Maschine-Schnittstelle
- Evaluation in der Simulation
- Evaluation im Realfahrzeug
- Bewertung der in den Fahrzeugen integrierten Technologien im Hinblick auf ihre Funktionalität
- Ableitung von Optimierungsbedarf
- Gewinnung von abschließenden Aussagen zur Technologiereife
- Gewinnung von Aussagen zum Einfluss der Kommunikationstechnologie auf die Funktionsleistung

Um diese Ziele zu erreichen, wurden die Aktivitäten von TP5 nach folgender Vorgehensweise strukturiert:

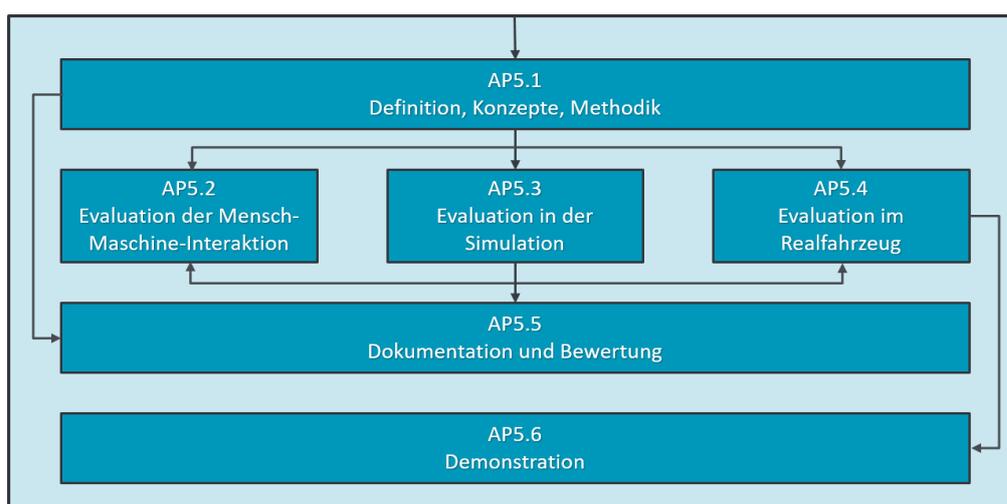


Abbildung 60: Arbeitsstruktur des TP5

AP5.1 schaffte die Grundlage für alle weiteren Arbeiten in TP5. Es wurde ein Evaluierungskonzept für die Bewertung der kooperativen Manöverautomatisierungsfunktionen erstellt. Dieses AP formulierte konkrete Fragestellungen in Bezug auf die Fahrfunktionen, welche im Rahmen von IMAGinE entwickelt und getestet werden sollen. Die entsprechende Durchführung der Evaluierungsarbeiten erfolgte dann in den nachfolgenden Arbeitspaketen AP5.2 „Evaluation der Mensch-Maschine-Interaktion“, AP5.3 „Evaluation in der Simulation“ und AP5.4 „Evaluation im Realfahrzeug“.

In AP5.2 wurden die MMI-Konzepte, resultierend aus den Arbeiten der vorherigen APs, mit dem Ziel eines optimierten Gesamtkonzeptes weiterentwickelt. Im Zentrum dieses APs stand die Evaluation der optimierten MMI-Konzepte innerhalb von fünf Probandenstudien. Resultat war die Zusammenstellung von Leitlinien, die die Ergebnisse und Erkenntnisse in Gestaltungsempfehlungen für kooperative Fahrerassistenzsysteme zusammenfassen.

AP5.3 umfasste die Evaluierungen mittels Simulationen. Mit Hilfe von Fahrzeugsimulationen wurden die technischen Systemkomponenten im Hinblick auf ihre Systemgrenzen untersucht sowie Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die die Einflüsse verschiedener System- und Umweltparameter auf die im Projekt IMAGinE entwickelten Funktionen untersuchten. Außerdem kamen Verkehrssimulationen zum Einsatz, um die verkehrlichen Auswirkungen der Funktionen, insbesondere im Hinblick auf Effizienz und Sicherheit, zu untersuchen.

Begleitend zu den Evaluierungen mittels Simulationen beinhaltete AP5.4 die Evaluierung des technischen, kooperativen Gesamtsystems im Fahrzeug. Es wurde einerseits die Funktionalität der in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten Funktionen der kooperativen Manöverabstimmung abschließend evaluiert sowie Optimierungsbedarfe identifiziert. Andererseits wurden die Wirkungen der Funktionen im Hinblick auf die Verkehrssicherheit, die Verkehrseffizienz und in eingeschränktem Maße auch auf den Fahrkomfort untersucht. Dazu gehörten unter anderem die Vorbereitung des Testgeländes und die Planung und Durchführung der Versuchsfahrten. Auch das Logging der Versuchsdaten und die Auswertung waren Gegenstand von AP5.4.

Schließlich wurde in AP5.5 „Dokumentation und Bewertung“ die Zusammenfassung aller Ergebnisse aus AP5.2, 5.3 und 5.4 behandelt. Diese wurden durch die Formulierung sogenannter „Kernaussagen“ dargelegt.

Die abschließende Demonstration und Präsentation der Ergebnisse erfolgte im Rahmen der Abschlusspräsentationen des Arbeitspakets, AP5.6 „Projektdemonstration“.

3.5.1 AP5.1: Definition, Konzepte, Methodik

Zielsetzung

Ziel des Arbeitspaketes AP5.1 war die Erarbeitung eines Evaluationskonzepts für die betrachteten Funktionen der kooperativen Manöver-Automatisierung. Die dort beschriebenen Untersuchungsansätze stellten das Rahmenwerk für die darauffolgenden Arbeitspakete in TP5 dar, in denen detaillierte Spezifikationen für einzelne Untersuchungen sowohl in der virtuellen (Fahr-, submikroskopische Fahrzeug- sowie Verkehrssimulation) als auch in der realen Evaluationsumgebung (Testgelände) abgeleitet werden konnten.

Im Einzelnen wurden laut Vorhabensbeschreibung 3.1 mit dem AP5.1 folgende Ziele verfolgt:

- Definition von Evaluationszielen
- Entwicklung von Evaluationsmethodiken
- Erarbeitung eines Evaluationskonzepts
- Identifikation des Testgeländes und Vertragsmanagement zu dessen Anmietung

Evaluationskonzept

Der inhaltliche Schwerpunkt des Evaluationskonzeptes lag in der Definition und Ausarbeitung von sogenannten Untersuchungsgegenständen. Es galt, möglichst konkrete Fragestellungen für die Bewertung der einzelnen Fahrfunktionen, die im Rahmen von IMAGinE entwickelt wurden, zu formulieren. Die Fragestellungen orientierten sich an den übergreifenden Projektzielen, wobei zusätzlich die technische Machbarkeit einzelner Funktionen und Gesichtspunkte des MMI betont wurden. Es wurden mehr als 60 Untersuchungsgegenstände definiert, um die Projektziele in den Bereichen technische Machbarkeit, Wirkung (Sicherheit, Komfort und Effizienz) sowie Gebrauchstauglichkeit (Nutzungseffizienz, Nutzerzufriedenheit und Effektivität) unter verschiedenen Aspekten zu behandeln. Die Aspekte ordneten wiederum die Untersuchungsgegenstände nach Betrachtungsbereichen. Dabei konnte eine Fragestellung sowohl das einzelne Fahrzeug bzw. dessen Fahrer, als auch eine Gruppe von mit dem IMAGinE-System ausgestatteten Fahrzeugen oder das Gesamtsystem betreffen. Damit gab das Evaluationskonzept den Rahmen und den Umfang für die in den folgenden Arbeitspaketen durchgeführten Evaluationsmethoden vor. Die genauen Untersuchungsgegenstände, die betrachtet wurden, sind in den partnerspezifischen Berichten aufgeführt.

Testgelände

Im Rahmen eines gemeinsamen Unterauftrags wurde in AP5.1 die Anmietung und Einrichtung eines Testgeländes zur Validierung der entwickelten Funktionen durchgeführt. Zweck dieses Testgeländes war neben der Validierung der Funktionen im Rahmen von gemeinschaftlichen Testfahrten auch die Durchführung einer Abschlussveranstaltung, bei welcher die Gäste die Projektergebnisse durch Fahrdemonstrationen erleben konnten.

Zur Auswahl eines geeigneten Testgeländes wurden verschiedene Testgelände in Deutschland nach ihrer Eignung für das IMAGinE-Vorhaben bewertet. In die Bewertung eingeflossen sind dabei:

- Allgemeine Anforderungen, wie z.B. die Möglichkeit zum Aufbringen von Fahrbahnmarkierungen oder Mindestanforderungen an Breite und Länge der Fahrbahnen und Zu- und Abfahrten
- Anforderungen für die Nutzung zur Abschlussdemonstration, wie z.B. ausreichend verfügbarer Platz
- Anforderungen, die sich aus den sechs IMAGinE-Funktionen ergeben

Neben den genannten Anforderungen sind auch die Kosten des Geländes in die Bewertung eingeflossen. Das Konsortium strebte die wirtschaftlich effizienteste Lösung an.

Ein wesentlicher Bestandteil der Recherche waren Vor-Ort-Besichtigungen, da nur so aussagekräftige Bewertungen über die Eignung getroffen werden konnten. Nach sorgfältiger Vorauswahl wurden folgende Testgelände besichtigt:

- DEKRA Testgelände Lausitzring
- Aldenhoven Testing Center
- Testcenter Rodgau-Dudenhofen
- TRIWO Testcenter Pferdsfeld

Die Wahl fiel auf das DEKRA Testgelände Lausitzring. Aufgrund von Corona-bedingten Reisebeschränkungen bei einigen Partnern, die das Übernachten in Hotels unmöglich machten, wurde jedoch ein anderes Testgelände mit geringerem Anfahrtsweg erforderlich. Zunächst wurde als kurzfristige Alternative der August-Euler-Flugplatz in Darmstadt-Griesheim für drei gemeinsame Testfahrten verwendet. Anschließend wurde eine Neubewertung der Testgelände durchgeführt. Die Wahl fiel auf das TRIWO Testcenter in Pferdsfeld. Dieses erfüllte die Anforderungen ebenfalls gut und konnte von den betroffenen Partnern ohne Hotelübernachtung erreicht werden.

Nachdem sich das TRIWO Testcenter bei den gemeinsamen Testfahrten bewährt hatte und weil aufgrund der anhaltenden Pandemie weiterhin Dienstreisebeschränkungen galten, wurde beschlossen, das TRIWO Testcenter auch als Gelände für die Abschlussveranstaltung zu verwenden. Das TRIWO Testcenter wurde erfolgreich für die Abschlussveranstaltung am 19.05.2022 und die dazugehörigen Vorbereitungsworkshops genutzt. Weitere Details zur Abschlussveranstaltung sind in AP5.6: Demonstration zu finden.



Abbildung 61: TRIWO-Testcenter Pferdsfeld bei der Abschlussveranstaltung

3.5.2 AP5.2: Evaluation der Mensch-Maschine-Interaktion

3.5.2.1 Zielsetzung, methodisches Vorgehen und wichtigste Arbeiten

Ziel von AP5.2 „Evaluation der Mensch-Maschine Interaktion“ war die Weiterentwicklung der MMI-Konzepte auf Basis der Ergebnisse vorheriger APs zu einem optimierten Gesamtkonzept. Im Zentrum dieses Aps stand die Evaluation der optimierten MMI-Konzepte durch vier Probandenstudien und eine Demonstratorstudie. Zudem sollten innerhalb dieser Studien die in AP2.4 und AP3.5 definierten Metriken zur Kooperationsleistung und Fahrerakzeptanz überprüft und erweitert werden. Die Ergebnisse und Erkenntnisse wurden abschließend in Gestaltungsempfehlungen für kooperative Fahrerassistenzsysteme zusammengefasst.

Als erstes wurde gemeinsam ein Konzept zur Vereinheitlichung der Probandenstudien erarbeitet. Auf Basis dieses Konzeptes wurden von den verschiedenen Partnern einzelne Evaluationsstudien im Fahrsimulator und im Realfahrzeug durchgeführt. Durch das gemeinsame Evaluationskonzept sind die Daten der Studien miteinander vergleichbar. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Studien der Partner und deren Inhalte.

Tabelle 13: Studienüberblick aus AP5.2

Partner	Studienart	Funktion	Studieninhalt	SAE-Level
WIVW	Evaluation	Funktion – F1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen Funktion – F5: Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	Evaluation des entwickelten MMI-Gesamtkonzepts der betrachteten Funktionen	0
WIVW	Demonstration	Funktion – F1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen Funktion – F5: Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	Demonstration der gekoppelten Simulation aus Fahrzeug- und Fahrsimulation und der umgesetzten Funktionsimplementierung in verschiedenen Szenarien der betrachteten Funktionen	4
TUM – Lehrstuhl für Ergonomie	Evaluation	Funktion – F1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen	Evaluation des MMI-Gesamtkonzepts der betrachteten Funktionen für Pkw unter dem Einsatz von Gamification zur Motivationsförderung	0 & 4
TUM – Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik	Evaluation	Funktion – F6: Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	Abschließende Bewertung des MMI-Gesamtkonzepts für kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	1
MAN	Expertenworkshop	Funktion – F6: Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	Expertenworkshop mit Videos vom MAN-MMI-Gesamtkonzept aus dem Realfahrzeug zur Bewertung der Gesamtfunktion und Usability	1

Detailreichere Informationen zu den Studien sind in den partnerspezifischen Abschlussberichten vorzufinden.

3.5.2.2 Ergebnisse und Leitlinien

Auf Basis aller Studien dieses Aps und der vorherigen Erkenntnisse anderer Aps wurden Leitlinien entwickelt, die funktionsübergreifende MMI-Prinzipien und Erkenntnisse zusammenfassen. Diese sind nachfolgend in verschiedene Kategorien sortiert dargestellt.

Darstellungsart und -ort der MMI-Schnittstelle

- Die Darstellung von Informationen für den Fahrer sind für ein kooperatives Fahrerassistenzsystem sowohl im Kombi-, als auch im Head-Up-Display (HUD) umsetzbar und zielführend
- Der Darstellungsort sollte ein natürliches Blickverhalten ermöglichen
- Fahrer bevorzugen Konzepte mit Augmented-Reality-Elementen (AR-Elemente). Untersuchungen unter Unsicherheitsbedingungen beim manuellen Fahren haben jedoch ergeben, dass möglicherweise die AR-Elemente den Fahrer vom umgebenden Verkehrsgeschehen abseits der Kooperationsituation ablenken könnten
- Eine dynamische Umfeldansicht stellte sich in der Evaluation in den Studien als äußerst positiv heraus, um Kooperationspartner und -situation zu erkennen
- Dynamische Darstellungen führen zu höheren Blickabwendungszeiten, welche den Fahrern selbst so nicht bewusst sind, und sollten deshalb auf ein notwendiges Minimum reduziert werden

Darstellungselemente der Schnittstelle

Folgende Elemente sollten in einem MMI-Konzept für kooperative Fahrerassistenzsysteme dargestellt werden:

- Visualisierung des Kooperationspartners
- Visualisierung des empfohlenen Fahrkorridors
- Status der kooperativen Abstimmung
- Handlungsanweisung
- Kooperative Situation, in der sich der Fahrer gerade befindet (z.B. Einfädeln auf der Autobahn, Überholmanöver, etc.)
- Automatisierungslevel

Gestaltung der Kooperationsanfragen

- Für Kooperationsanfragen sollte als Standardreaktion „Annehmen der Kooperationsanfrage“ mit der Möglichkeit zum Übersteuern bzw. Ablehnen gewählt werden
- Im Fall des automatisierten Fahrens sollte der Fahrer die Möglichkeit haben, die Reaktion auf Kooperationsanfragen zu beeinflussen (z.B. Standardreaktion, Höhe der Kosten)

- Im Fall des assistierten Fahrens sollte der Fahrer die Möglichkeit haben, eine Akzeptanzschwelle/Hysterese bzgl. der Geschwindigkeit anzugeben

Interaktion unter Unsicherheitsbedingungen

- Die Untersuchungen unter Unsicherheitsbedingungen haben gezeigt, dass die Gefahr des „Übervertrauens“ in das System zum kooperativen Fahren besteht
- Das HUD ist für die Anzeige von Warnungen geeignet

Motivations- und Überzeugungsstrategien

- Motivations- und Überzeugungsstrategien (z.B. Gamification oder Vermenschlichung) werden in den untersuchten Ausprägungen von den Fahrern nicht als störend empfunden
- Zur Erhöhung der Kooperationsbereitschaft sollten Motivationsstrategien (z.B. Gamification) an den Fahrertyp und die konkrete Situation angepasst werden
- Der Einsatz von Motivationsstrategien (z.B. Gamification & Vermenschlichung) im MMI hat das Potenzial die Kooperation mit anderen Fahrzeugen zu verbessern. Je nach Anwendungsfall und Umsetzung kann dieser Vorteil jedoch verschwinden

Fahrerinformation

- Fahrer möchten erkennen können, wer der potenzielle Kooperationspartner ist
- Aus der Perspektive kooperationsgewährender Fahrer ist ein expliziter Hinweis auf den benötigten Kooperationspartner verzichtbar, wenn dieser eindeutig identifizierbar ist
- Wenn eine gelingende Kooperation ein bestimmtes Verhalten des Fahrers erfordert, sollte dieses konkret instruiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass eine solche Anweisung nicht zu Reaktanz führt und damit die Kooperationsbereitschaft reduziert
- Ein Zeitbudget von 7 Sekunden ist ausreichend, um die Situation zu erfassen und eine Kooperationsentscheidung zu treffen
- Im Falle einer Unsicherheitsbedingung, die zu einer Abbruchsituation führt, sollte der Abbruchgrund (in Form von Text oder Icon) sowohl beim automatisierten als auch beim assistierten Fahren angegeben werden, um das Vertrauen in das System und seine Verständlichkeit zu erhöhen

Generelle Akzeptanz der Funktionen

Die abschließenden Untersuchungen in AP5.2 haben erneut gezeigt, dass die Fahrer eine Assistenz zur Unterstützung kooperativen Fahrens akzeptieren. Dies gilt für manuelles und für automatisiertes Fahren.

Funktionalität

Die abschließenden Untersuchungen in AP5.2 zeigen, dass Fahrern die Bedienung eines kooperativen Fahrerassistenzsystems mit den entwickelten MMI-Konzepten gelingt und dass das System zu stärker kooperativem Fahrverhalten führt. Zudem lassen sich folgende Erkenntnisse zur Funktionalität des Systems nennen:

- Da die wahrgenommenen Kosten eines Fahrstreifenwechsels für viele Fahrer geringer sind als die einer Bremsung zur Lückenerstellung, sollten Fahrstreifenwechsel als kooperatives Manöver gegenüber Bremsmanövern bevorzugt werden
- Die Untersuchung von Abbruchsituationen des IMAGinE-Systems bei hochautomatisierten Fahrten haben gezeigt, dass der zeitgleiche Abbruch von Kooperation und Automation ungeeignet ist
- Das vom kooperativen Assistenzsystem erzeugte Fahrverhalten sollte dem natürlichen Fahrverhalten entsprechen, um Systemabbrüche z.B. durch Übersteuern zu vermeiden
- Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Manöverentscheidung kooperativer Assistenz (konkret das An- bzw. Ablehnen einer Kooperation) mit steigendem Automatisierungsgrad vom System getroffen werden darf
- Die Automation wird selten bei Kooperationsanfragen übersteuert
- Im Fall des manuellen Fahrens erscheint alternativ zur expliziten Zusage via Kooperationsbutton eine Fahrerintentionserkennung möglich und sollte weiter untersucht werden

Erkenntnisse zur Methodik und verwendeten Metriken

Nachdem 17 empirische Studien innerhalb des Projekts IMAGinE erfolgreich durchgeführt wurden, konnten folgende Erkenntnisse bzgl. der Methodik gewonnen werden:

- Fahrsimulatorstudien sind gut geeignet, um das Verhalten der Fahrer im Umgang mit kooperativer Assistenz zu untersuchen. Jedoch hat sich in der Evaluation unter Unsicherheitsbedingungen herausgestellt, dass sich das subjektive Risikoempfinden vermutlich aufgrund der Fahrsimulation eher verringert
- Die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen zur Unterstützung kooperativen Fahrens in der Fahrsimulation hat gezeigt, dass in der Entwicklung des Versuchsdesigns für eine Fahrsimulatorstudie besonderer Wert daraufgelegt werden sollte, die Kosten einer Kooperation möglichst realistisch darzustellen
- Zur Messung der subjektiven Akzeptanz hat sich der Fragebogen nach Van der Laan (Van der Laan et al., 1997 [8]) als gutes und einfach anzuwendendes Maß herausgestellt
- Zur Messung der User Experience hat sich der subjektive Fragebogen User Experience Questionnaire (UEQ) (Laugwitz et al., 2008 [9]) als gutes Maß herausgestellt
- Als schnelle und einfache Methode um subjektiv die Usability zu messen, hat sich die System-Usability-Scale (Brooke, 1996 [10]) bewährt

- Die Erfassung der Blickdaten mittels Blickerfassungssystemen wie Smart Eye hat sich in den Untersuchungen als wertvolle Größe erwiesen, um Ablenkungen während der Nutzung von kooperativen Fahrerassistenzsystemen zu messen. Als erhobene Größen bieten sich die Blickabwendungszeiten, Verteilung der Blick- bzw. Fixationsfrequenz und Pupillendurchmesser, als auch die Erfassung des allgemeinen Blickverhaltens an
- Bevor aufwändige Probandenstudien durchgeführt werden, haben sich Expertenstudien (z.B. mit Video- und Bildmaterial) als zweckmäßig erwiesen
- Die gekoppelte Simulationsumgebung von Fahrzeug- und Fahrsimulation ist im Entwicklungsprozess hilfreich

3.5.2.3 Fazit

Die durchgeführten Studien in AP2.4 und AP3.5 wurden durch die abschließende Gesamtevaluation der entwickelten MMI-Konzepte in AP5.2 bestätigt und erweitert. Die Studien haben wichtige Erkenntnisse zur Gestaltung der Mensch-Maschine Interaktion für kooperative Fahrerassistenzsysteme ermittelt. Es konnten wertvolle Aspekte zur Funktionsweise und -charakteristik von kooperativer Assistenz, als auch auf die MMI-Entwicklung bezogene Methodik und verwendeten Metriken gewonnen werden. Die Ziele des APs wurden folglich erreicht.

3.5.3 AP5.3: Evaluation in der Simulation

Das AP5.3 „Evaluation in der Simulation“ umfasste grundsätzlich zwei Arten von Untersuchungsgegenständen. Dies waren zum einen die technischen Systemkomponenten, die im Hinblick auf ihre Systemgrenzen untersucht wurden. Darüber hinaus wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die die Einflüsse diverser System- und Umgebungsparameter auf die im IMAGinE-Projekt entwickelten Funktionen untersuchten. Hierzu wurden Fahrzeugsimulationen eingesetzt. Die zweite Säule umfasste die Analyse der verkehrlichen Wirkungen der Funktionen, die insbesondere mit entsprechenden Verkehrssimulationen erfolgte.

Das Arbeitspaket startete bereits im Juli 2020 und endete parallel mit dem AP5.4 „Evaluation im Realfahrzeug“ im April 2022. Bereits sehr früh im Gesamtprojekt wurden als Vorbereitung jedoch spezifische Anforderungen gesammelt, die in der Umsetzung der entwicklungsbegleitenden IMAGinE-Simulationsumgebung, aber auch bei partnerspezifischen Simulationsaufbauten berücksichtigt werden konnten. Im Fokus standen hierbei insbesondere notwendige Schnittstellen zum IMAGinE-System und technische Funktionalitäten für eine Vereinfachung der Versuchsdurchführung und Testautomatisierung bzw. einer anschließenden Auswertung der Simulationsdaten (weiterführende Informationen siehe Bericht für das AP3.4).

Mit der Simulation wurden von den Partnern im Rahmen von AP5.3 folgende IMAGinE-Funktionen untersucht:

Tabelle 14: Übersicht der Funktionen und der beteiligten Partner in der Simulation

Funktion	Partner
F1 Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen	Continental Bosch Opel Mercedes-Benz Volkswagen BMW
F2 Kooperative Längsführung auf Autobahnen	MAN Mercedes
F3 Kooperatives Überholen auf Landstraßen	Volkswagen
F4 Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung	Die Autobahn
F5 Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	Continental Bosch Opel
F6 Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	MAN

Hierbei kamen Metriken zum Einsatz, die in AP5.1 spezifiziert wurden. Die Auswertung der Simulationsdaten bezog sich im ersten Schritt auf die Untersuchungsgegenstände, die ebenfalls im Rahmen des AP5.1 erarbeitet wurden. Die Evaluation selbst wurde auf Grund der Vielzahl an partnerspezifischen Implementierungen im Rahmen des IMAGinE-Projekts von jedem Projektpartner selbst durchgeführt und entsprechend dokumentiert. Im Detail hatte sich das AP5.3 mit folgenden Aufgaben beschäftigt:

- Planung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungsgegenstände
- Evaluation der technischen Komponenten
- Ermittlung von Einsatzbereichen und Einsatzgrenzen
- Ermittlung der Einflüsse diverser System- und Umgebungsparameter auf die Funktionalität, z.B. anhand von Sensitivitätsanalysen
- Untersuchungen zur mikro- und makroskopischen Verkehrslage
- Untersuchung der verkehrlichen Wirkungen im Hinblick auf Verkehrssicherheit und -effizienz (Verkehrssimulation)

- Abschließende Evaluation der Funktionalität zur kooperativen Manöverabstimmung in der Simulation
- Dokumentation der Evaluationsergebnisse und Identifikation von Optimierungspotenzial

Auf Basis des ebenfalls in AP5.1 entwickelten Evaluationskonzepts wurden die abschließenden Untersuchungen der Funktionalität des technischen Systems und der Funktionen der kooperativen Manöverassistenz durchgeführt. Gegenstand der Untersuchungen waren die Funktionalität einzelner Systemkomponenten bzw. des Gesamtsystems sowie die Funktionen selbst. Ziel war es insbesondere, Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen zu ermitteln. Dies wurde, wie bereits erwähnt, sowohl mit der entwicklungsbegleitenden IMAGinE-Simulationsumgebung als auch mit partnerspezifischen Simulationsaufbauten realisiert. Besonders interessant waren auch solche Untersuchungsgegenstände, die übergreifend sowohl in der Simulation und im Realfahrzeug durchgeführt werden konnten und somit einen Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Evaluationsmethoden erlaubte.

Einen zweiten Schwerpunkt der simulativen Evaluationen stellte die Wirkungsanalyse im Hinblick auf die Sicherheit und die Verkehrseffizienz dar. Hierzu wurden mikro- und makroskopische Verkehrsflusssimulationen eingesetzt, um Untersuchungen im Sinne des Evaluationskonzepts durchzuführen. Es wurden verkehrssicherheits- und verkehrseffizienzrelevante Parameter untersucht, deren Verhalten einen Rückschluss auf die Wirksamkeit der IMAGinE-Funktionen zulässt. Der Fokus lag dabei beispielsweise auf der simulativen Ermittlung der Einflüsse auf das Unfallrisiko, wie beispielsweise auf das Abstandsverhalten der automatisierten Fahrmanöver im Vergleich zu den von Menschen gesteuerten Manövern. Ein zweiter wesentlicher Untersuchungsgegenstand war die Verkehrseffizienz. Hierzu wurde der Einfluss der Funktionen auf die kleinräumige Verkehrslage untersucht.

Insgesamt wurden von den Partnern im Rahmen von AP5.1 mehr als 60 Untersuchungsgegenstände definiert und in unterschiedlichen Arbeitspaketen mit den Schwerpunkten Mensch-Maschine-Interaktion (AP5.2), Simulation (AP5.3) und Realfahrzeug (AP5.4) evaluiert. Ein besonderer Vorteil der Simulation gegenüber der Realfahrzeugtests liegt in der hohen Reproduzierbarkeit wiederholter Simulationsdurchläufe und Trennschärfe hinsichtlich Parameteränderungen. So konnten für die untersuchten Konstellationen von Simulator und kooperativem System Grenzwerte hinsichtlich des Alters von Daten, also der Zeitdifferenz zwischen Generierung und Empfang der MCM, sowie minimale Senderaten ermittelt werden, für die eine kooperative Manöverabstimmung noch durchgeführt werden kann. Ebenso konnte an exemplarischen Szenarien gezeigt werden, dass speziell für Lkw-Überholvorgänge mittels Kooperation mehr Überholvorgänge in kürzerer Zeit möglich sind und zusätzlich auch die mittlere Reisegeschwindigkeit steigt. In einer weiteren Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass mittels Kooperation der Kraftstoffverbrauch sinkt und durch eine V2X-basierte Absicherung der Fahrzeugabstände die Gefahr von Konflikten mit anderen Verkehrsteilnehmern und damit verbundenen potenziellen Unfällen reduziert werden kann.

Im Rahmen von IMAGinE wurde auch eine kooperativ-strategische Verkehrsverteilung im Hinblick auf ihre verkehrlichen Wirkungen untersucht. Zur Bewertung wurden unter anderem folgende Kennwerte ermittelt

- Veränderung der Betriebskosten
- Veränderung der Abgasbelastungen
- Veränderung der Verkehrssicherheit
- Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr
- Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr

Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass die Wirkung einer kooperativ-strategischen Verkehrsverteilung stark vom Verkehrsnetz und den Verkehrszuständen abhängt. Erst im Fall einer Störung, also bei Überlastungen im Netz, zeigte die im Projekt umgesetzte Verkehrslenkung durch einen strategischen Support merklich positive Effekte. Hierbei ist es von der Attraktivität einer möglichen Umleitungsrouten abhängig, wie groß einerseits die Befolgungsrate entsprechender Umleitungsempfehlungen für eine Wirkung sein müssen und andererseits, wie groß diese Wirkungen ausfallen.

Ergebnisse zu weiteren Untersuchungsgegenständen und detailliertere Informationen zu den durchgeführten Evaluationen können den spezifischen Berichten der oben genannten simulierenden Partner entnommen werden. Zusammenfassend über alle Partner hinweg kann jedoch gesagt werden, dass die IMAGinE-Basisidee und die daraus entstandenen konzeptionellen Ansätze und Umsetzungen erfolgreich in Konzeptstudien evaluiert werden konnten. Mit den im Rahmen des Projektes entstandenen Simulationsaufbauten und Funktionsumsetzungen konnten nicht nur eine Vielzahl von Untersuchungsgegenständen beantwortet, sondern auch Kernaussagen für das kooperative Fahren formuliert werden, die im abschließenden AP5.5 zusammengefasst wurden.

3.5.4 AP5.4: Evaluation im Realfahrzeug

AP5.4 hatte die Evaluation des technischen, kooperativen Gesamtsystems im Fahrzeug zum Ziel. Es wurden einerseits die Funktionalität der in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten Funktionen der kooperativen Manöverabstimmung abschließend evaluiert und Optimierungsbedarf identifiziert. Andererseits wurden die Wirkungen der Funktionen im Hinblick auf die Verkehrssicherheit, die Verkehrseffizienz und, in eingeschränktem Maße, auch auf den Fahrkomfort untersucht. Dazu gehörten unter anderem die Vorbereitung des Testgeländes und die Planung und Durchführung der Versuchsfahrten. Auch das Aufzeichnen der Messwerte und die Auswertung gehörten zu AP5.4.

Das Arbeitspaket startete im August 2021 und endete Ende April 2022 mit der Fertigstellung der Evaluation der Systemkomponenten und des kooperativen Gesamtsystems in den Versuchsträgern und der Beantwortung von sogenannten Untersuchungsgegenständen.

Im Folgenden werden nähere Details zu den Arbeiten des AP5.4 beschrieben.

AP5.4 übernahm direkt die Versuchsaufbauten aus dem AP4.4. Mittels eines vorher vereinbarten Loggings der Fahrzeugdaten sowie anhand von definierten Untersuchungsszenarien wurden zunächst Daten bei Realfahrten erzeugt und gesammelt. Anschließend wurden diese im Rahmen der Auswertung so aufbereitet, dass sie durch die Auswertungsalgorithmik analog zur Zielstellung des Versuchs verarbeitet werden konnten. Hierbei kamen Metriken zum Einsatz, die in AP5.1 definiert und spezifiziert wurden. Die Auswertung der Versuchsfahrten (Evaluation) bezog sich im ersten Schritt auf die Untersuchungsgegenstände, die in AP5.1 erarbeitet wurden. Die Evaluation selbst wurde auf Grund der Vielzahl an partnerspezifischen Implementierungen im Rahmen des IMAGinE-Projekts von jedem Projektpartner selbst durchgeführt und jeweils dokumentiert. Grundsätzlich hat sich die Evaluierung im Fahrzeug mit drei Arten von Untersuchungen beschäftigt: der Mensch-Maschine-Interaktion, den technischen Systemkomponenten und den Funktionen F1, F2, F4, F5 und F6.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Zuordnung der Funktionen, die von den IMAGinE-Partnern in die Versuchsträger integriert und evaluiert wurden:

Tabelle 15: Übersicht der Funktionen und der beteiligten Partner im Realfahrzeug

Funktion	Partner
F1 Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen	Continental Bosch Opel
F2 Kooperative Längsführung auf Autobahnen	MAN
F4 Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung	Die Autobahn
F5 Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	Continental Bosch Opel
F6 Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	MAN

Während die Evaluation der Mensch-Maschine-Interaktion gesamthaft in AP5.2 abgedeckt wurde, wurden die technischen Systemkomponenten und die Funktionen im Realfahrzeug in AP5.4 untersucht. Wesentliche Ergebnisse, die mit der Planung und Durchführung der genannten Untersuchungen in AP5.4 erreicht wurden, sind abschließende Aussagen zur Funktionalität, Optimierungspotenzial und Technologiereifegrad (Technology Readiness Level). Des Weiteren wurden Aussagen zur Wirkung im Hinblick auf Verkehrssicherheit, Verkehrseffizienz und Komfort getroffen und die resultierenden Ergebnisse zum nächsten Arbeitspaket AP5.5 übergeben, in dem diese in Form von Kernaussagen als Gesamtprojektergebnis formuliert wurden.

Im Wesentlichen ergaben sich daraus die Ziele des AP5.4 laut der Vorhabenbeschreibung:

- Evaluation der technischen Komponenten im Realfahrzeug
- Planung, Durchführung und Auswertung der Versuchsfahrten im Rahmen von AP5.4 in Bezug auf die in AP5.1 gesammelten Untersuchungsgegenstände
- Dokumentation der Evaluationsergebnisse
- Ableitung von Optimierungsbedarf

Auf Basis des in AP5.1 entwickelten Evaluierungskonzepts wurden die abschließenden Untersuchungen der Funktionalität des technischen Systems und der Funktionen der Kooperativen Manöverabstimmung im Realfahrzeug durchgeführt. Mit Hilfe der in TP2, 3 und 4 entwickelten Fahrzeugumgebung wurden gezielte, zuvor ausgewählte oder entwickelte Evaluationsmetriken zur Gewinnung der Erkenntnisse genutzt. Gegenstand der Untersuchungen waren die Funktionalität einzelner Systemkomponenten bzw. des Gesamtsystems sowie die Funktionen selbst. Ziel war es, in jedem Versuchsträger insbesondere Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen der Untersuchungsgegenstände zu ermitteln. Das zur Evaluierung genutzte Framework war im Wesentlichen identisch zu dem, das in TP4 für die Untersuchung der Systemkomponenten genutzt wurde. Zusätzlich dazu haben einzelne Partner zusätzliche Komponenten mit der bestehenden IMAGinE-Architektur gekoppelt, um die Untersuchungen durchzuführen.

Einen zweiten Schwerpunkt der fahrzeugseitigen Evaluationen stellte die Wirkungsanalyse im Hinblick auf die Sicherheit und die Verkehrseffizienz dar. Hierzu wurden Evaluationsumgebungen, im Wesentlichen durch erprobte Fahrmanöver, geschaffen. Dies ermöglichte die zur realitätsnahen Abbildung des Fahrverhaltens notwendige Nutzung der real im Fahrzeug integrierten Steuerungsalgorithmen. Die Evaluierungsumgebungen wurden genutzt, um Untersuchungen im Sinne des Evaluationskonzepts durchzuführen. Es wurden verkehrssicherheits- und verkehrseffizienzrelevante Parameter untersucht, deren Verhalten einen Rückschluss auf die Wirksamkeit der IMAGinE-Funktionen zulässt. Die Partner haben die Evaluationen basierend auf dem „IMAGinE18“-Konzept und anderen Konzepten zur kooperativen Manöverabstimmung durchgeführt. Die verschiedenen partnerspezifischen Konzepte sind in Deliverable D2.5 dokumentiert.

Ergebnisse

Die Ziele des Arbeitspaketes, die technischen Komponenten und kooperativen Fahrfunktionen ganzheitlich im Realfahrzeug zu evaluieren, wurden erreicht. Die Funktionsreife der Funktionen war zum Ende des Projekts robust genug, um in einer Fahrzeugdemonstration präsentiert zu werden und die im IMAGinE-Projekt definierten Untersuchungsgegenstände mit dem aktuellen Software-Stand zu beantworten und daraus Kernaussagen zum kooperativen Fahren zu erarbeiten. Im Laufe der AP5.4-Arbeiten konnte in den Integrationsworkshops sowohl mit der gemeinsam umgesetzten Software als auch mit den partnerspezifischen Manöverabstimmungen eine Kooperation im Fahrzeug erfolgreich getestet und durchgeführt werden. Detaillierte Informationen können den partnerspezifischen Veröffentlichungen und Abschlussberichten entnommen werden.

3.5.5 AP5.5: Dokumentation und Bewertung

Zielsetzung

Gegenstand des Arbeitspakets AP5.5 war die Dokumentation und abschließende Bewertung der Evaluationsergebnisse.

Im Einzelnen wurden in der VHB 3.1 die folgenden Ziele für das AP5.5 formuliert:

- Dokumentation der Evaluationsergebnisse
- Ableitung von Optimierungsbedarf
- Bewertung der Funktionen und deren Technologiereife sowie Potenzialabschätzung

Dieses Arbeitspaket begleitete somit die auswertenden Arbeitspakete im Teilprojekt 5 und mündete in einer Gesamtzusammenfassung aller Ergebnisse, die von den Projektpartnern gemeinsam in so genannten „Kernaussagen“ formuliert wurden. Die Kernaussagen wurden nach Schwerpunkten bzw. Innovationen im Projekt gebündelt und sind im Folgenden dargestellt. Die den Evaluierungen zugrundeliegenden Zielsetzungen und angewandten Methoden sind in den vorangegangenen APs in TP5 dargestellt; die detaillierteren Umsetzungen und Ergebnisse finden sich in den partnerspezifischen Abschlussberichten.

3.5.5.1 Kooperative Manöverabstimmung

Um Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern realisieren zu können, wurden die theoretischen Konzepte zur Interaktion zwischen Fahrzeugen anhand von konkreten Funktionen und Anwendungsfällen sowohl in Simulationen als auch in realen Pkw und Lkw auf Landstraßen und Autobahnen untersucht. IMAGinE hat den Beweis für die Funktionsfähigkeit kooperativer Manöverabstimmung erbracht. Eine kooperative Manöverabstimmung hilft Fahrzeugen, die Intention der anderen Fahrzeuge klar zu erkennen.

Die verschiedenen Aspekte kooperativer Manöverabstimmung wurden in mehreren, spezifischeren Umsetzungen der Basiskonzepte untersucht und Potenziale aufgezeigt.

Die Basiskonzepte zur Manöverabstimmung decken sowohl die zeitlich und räumlich begrenzten Kooperationsräume als auch Kooperationen über größere Distanzen ab und ergänzen sich somit gegenseitig.

Manöverabstimmung ist unter anderem abhängig von Kooperationsbereitschaft, Kommunikationsmöglichkeiten und relativen Abständen.

Manöverabstimmung ist ein kontinuierlicher Prozess, bei dem das Manöver oder die Intention immer wieder aktualisiert werden muss, ohne jedoch den Charakter der Kooperation aus den Augen zu verlieren. Diese kann in vielerlei Facetten umgesetzt werden. Zu berücksichtigende Faktoren sind die Kanallast der Kommunikation, der benötigte Rechenaufwand bei der Manöverplanung sowie die generelle Möglichkeit der Fahrzeuge - bedingt durch das konkrete Szenario - eine gemeinsame Lösung für das Manöver zu finden. Kooperative Manöverabstimmung ist mit den aktuell verfügbaren Technologien, wie etwa V2X-Kommunikation, umsetzbar. Damit ist das

technische Potenzial geschaffen, viele Verkehrssituationen deutlich sicherer und komfortabler zu bewältigen.

3.5.5.2 Kommunikationsmechanismen

Die für das kooperative Fahren notwendigen Informationen werden durch den Versand von V2X-Nachrichten zwischen Verkehrsteilnehmern ausgetauscht. IMAGinE entwickelte speziell für die Manöverplanung und -abstimmung neue Nachrichtenformate.

In IMAGinE wurden neue Nachrichtenformate definiert und hinsichtlich der Standardisierbarkeit untersucht.

Zur Realisierung der in IMAGinE untersuchten kooperativen Funktionen wurden im Projekt mehrere neue Nachrichtenformate definiert: Die „Maneuver Coordination Message“ (MCM) dient zur Abstimmung kooperativer Fahrmanöver, indem Trajektorien zwischen benachbarten Fahrzeugen ausgetauscht und verhandelt werden. Mit der „IMAGinE Driving Strategy Message“ (IDSM) werden zusätzliche Nachrichten zwischen Verkehrsteilnehmern ausgetauscht, die für einige Funktionen notwendig sind, um eine strategische Manöverabstimmung zu ermöglichen. Im Projekt IMAGinE kam dieses Nachrichtenformat vor allem bei der Funktion für kooperatives Überholen von Lkw auf Autobahnen zum Einsatz. Die „IMAGinE Traffic Distribution Message“ (ITDM) wurde entwickelt, um kollektive Strategien aus dem Verkehrsmanagement in lokale kooperative Abstimmungen zwischen einzelnen Fahrzeugen zu integrieren.

Zudem wurde das bestehende Nachrichtenformat Collective Perception Message (CPM) erweitert, um die Anforderungen an eine kollektive Perzeption in IMAGinE zu erfüllen. Die entwickelten Konzepte für kollektive Perzeption und kooperative Manöverabstimmung können mit dem sich aktuell in Standardisierung befindenden Nachrichtenformat CPM und der in IMAGinE definierten MCM umgesetzt werden.

Während der Markteinführungsphase können alle Manöverkoordinierungsnachrichten zusammen mit den V2X-Standardnachrichten in einem Kanal betrieben werden. In IMAGinE durchgeführte Untersuchungen zur Kanallast zeigen, dass der Nachrichtenversand und -empfang mit CAM, CPM, MCM und IDSM bis zu einer Ausstattungsrate von 20% realisierbar ist, ohne die Kanallast regulieren zu müssen. Für eine höhere Ausstattungsrate wird ein Ausweichen der MCM in einen eigenen Kanal empfohlen.

3.5.5.3 Kooperatives Umfeldmodell

Die fahrzeugeigene Sensorik erfasst das unmittelbare Umfeld. Das System stößt jedoch an seine Grenzen, wenn die Umgebungssituation komplexer oder die Wahrnehmung beeinträchtigt wird. IMAGinE erweiterte die Sensorsicht des einzelnen Fahrzeugs, indem die Informationen vieler Kooperationspartner per V2X-Technologie ausgetauscht und zu einem individuell erweiterten Umfeldmodell zusammengefasst wurden. So entstand ein umfassenderes Bild der Gesamtsituation. Die Idee dahinter: „Sehen mit den Augen der anderen“.

Mit kollektiver Perzeption wird die Wahrnehmung des einzelnen durch das Wissen der anderen ergänzt und somit das eigene Modell des Fahrzeugumfelds erweitert.

Das kooperative Umfeldmodell bildet die Informationsbasis für die kooperative Manöverabstimmung und bringt bereits in dieser ersten Implementierung einen deutlichen Informationsgewinn, indem es die Wahrnehmung des umgebenden Verkehrsgeschehens einbezieht. So können für bordautonome Sensoren verdeckte Objekte dennoch frühzeitig erkannt werden. Die kollektive Perzeption ist eine sinnvolle Ergänzung zur erweiterten Wahrnehmung. Dafür muss das gesamte System darauf ausgelegt sein, angefangen bei der genauen Lokalisierung der Objekte bis hin zur präzisen Prädiktion der Objekte, um echtzeitfähig zu sein.

3.5.5.4 Kooperative Mensch-Maschine-Interaktion

Eine zentrale Herausforderung für die Zukunft liegt in der Entwicklung verständlicher und intuitiver Assistenzkonzepte, die die Fahrerinnen und Fahrer zu kooperativem Fahren motivieren.

IMAGinE hat kooperatives Fahren anhand von Probandenstudien im Fahrsimulator untersucht und Lösungsvorschläge für intuitive MMI-Konzepte vorgestellt.

Mittels Probandenstudien in verschiedenen Untersuchungsumgebungen, wie zum Beispiel Pkw- und Lkw-Fahrsimulatoren, wurden Gestaltungslösungen entwickelt, die Fahrerinnen und Fahrer während kooperativer Interaktionen unterstützen. Verschiedene Use Cases betrachteten dabei die unterschiedlichen in IMAGinE entwickelten kooperativen Funktionen, wie z.B. das kooperative Auffahren, das kooperative Abbiegen und das kooperative Überholen. Die Studien betrachteten dafür (1) nicht nur Pkw, sondern auch Lkw, (2) nicht nur Idealweltbedingungen, sondern auch Systemgrenzen oder gar Funktionsausfälle, (3) nicht nur den manuellen Fahrer, sondern auch automatisiertes Fahren. Insgesamt wurden 24 empirische Studien vorbereitet und an verschiedenen Fahrsimulatoren durchgeführt, an denen mehr als 600 Probanden teilgenommen haben. Die gesamte Versuchszeit betrug über 1.000 Stunden.

Im Mittelpunkt der Studien standen der Umgang der Probanden mit den verschiedenen kooperativen Assistenzfunktionen, das resultierende Fahrverhalten inkl. Sicherheitsaspekten sowie die Bewertung von Verständlichkeit und Akzeptanz durch die Fahrer.

Die Studienergebnisse zeigen, dass die Fahrer eine Assistenz zur Unterstützung kooperativen Fahrens akzeptieren und bei Verwendung passender Anzeige- und Bedienkonzepte als einfach und sicher erleben. Die Studienergebnisse mündeten in einer Reihe von Erkenntnissen und Leitlinien für die benutzergerechte Gestaltung von MMI für kooperative Fahrerassistenzsysteme.

So haben die Probandenstudien z.B. gezeigt, dass das MMI für ein kooperatives Fahrerassistenzsystem sowohl im Kombi- als auch im Head-Up-Display dargestellt werden kann. Die Fahrer selbst bevorzugen Konzepte mit Augmented Reality Elementen. Eine dynamische Umfeldansicht, die z.B. das Ego-Fahrzeug und den umgebenden Verkehr inkl. des Kooperationspartners visualisiert, erweist sich ebenfalls als passend. Wichtig ist jedoch für alle MMI-Konzepte, dass der Fahrer nicht unnötig visuell belastet wird.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Motivationsstrategien (z.B. Gamification) das Potenzial hat, die Kooperation zwischen den Verkehrsteilnehmern zu verbessern.

Im Fall automatisierten Fahrens sollte der Fahrer die Möglichkeit haben, das System und insbesondere die Reaktion auf Kooperationsanfragen zu beeinflussen. Dies kann z.B. über die Höhe der Kosten passieren, die das automatisierte Fahrzeug für eine Kooperation in Kauf nimmt.

Die kooperative MMI bindet den Menschen in die kooperative Manöverabstimmung ein und ist damit Voraussetzung für Verständnis, Akzeptanz und Vertrauen der Fahrer.

In IMAGinE wurden die Grundlagen für eine nutzerzentrierte Gestaltung der Anzeige- und Bedienkonzepte geschaffen. Die in IMAGinE entwickelten Funktionen werden den Verkehrsteilnehmern auf intuitive Weise ermöglichen, sich im Straßenverkehr kooperativ und partnerschaftlich zu verhalten. Dies eröffnet die Chance, die Verkehrssicherheit weiter zu erhöhen.

3.5.5.5 Simulationsumgebung

In IMAGinE wurden exemplarische Fahrfunktionen entwickelt, die nicht nur ein einzelnes Fahrzeug und seine unmittelbare Umgebung im Fokus haben, sondern mehrere, mittels V2X-Kommunikation interagierende Fahrzeuge für eine gemeinsame Lösungsfindung einbeziehen.

Die Komplexität von kooperativen Systemen steigt mit der Anzahl teilnehmender Fahrzeuge und kann dadurch nur mit Simulation systematisch und reproduzierbar getestet werden.

Komplexe kooperative Systeme können nur mit Simulation hinreichend getestet werden. Die Komplexität kooperativer Gesamtsysteme steigt mit der Anzahl der Verkehrsteilnehmer und potenzieller Kooperationspartner. Daher war die Simulation von der frühen Konzept- und Entwicklungsphase bis hin zur Integration in die realen Fahrzeuge fester Bestandteil eines reproduzierbaren und gefahrlosen Testens auch kritischer Situationen.

Mit einer flexiblen und modularen Simulationsarchitektur können kooperative Systeme effizient entwickelt werden.

Die Projektpartner entwickelten eine flexible und modulare Simulationsarchitektur, welche die Untersuchung kooperativer Manöver mehrerer Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Die so entstandenen Simulationen wurden projektbegleitend sowohl zur Entwicklung der kooperativen Manöverabstimmung als auch für partnerspezifische Softwarekomponenten eingesetzt. Funktionsübergreifende Testkataloge ermöglichten ein systematisches Variieren von Randbedingungen und eine zielgerichtete Analyse unterschiedlicher Parametrierungen in einem system- und fahrzeugübergreifenden Kontext. Zudem wurden zur Verifikation technischer Komponenten auch aufgezeichnete Realdaten in die Simulation eingespeist und gezielt manipuliert. In spezifischen Situationen konnte so ein möglichst realitätsnahes Verhalten der Verkehrsteilnehmer erreicht werden. Die Integration realer V2X-Kommunikationshardware und der Einsatz fahrzeugnaher Testmethoden wie Vehicle-in-the-Loop ebneten den Weg, um die kooperativen Funktionen auch im realen Fahrzeug erlebbar zu machen. Diese wurden schließlich in 10 reale Versuchsfahrzeuge integriert und in mehr als 20 gemeinsamen Workshops auf verschiedenen Testgeländen

erprobt. Durch umfangreiche Tests konnten die Partner erfolgreich eine durchgehende Funktionalität der kooperativen Manöverabstimmung in unterschiedlichen Szenarien und Partnerkonstellationen darstellen.

3.5.5.6 Infrastruktur

Kooperative Manöverabstimmung zwischen Fahrzeugen kann durch strategische Verkehrsinformationen aus dem zentralen Verkehrsmanagement unterstützt werden.

In IMAGinE wurde auch die Infrastruktur und mit ihr das Verkehrsmanagement in die Entwicklung mit einbezogen. Im Rahmen der kooperativ-strategischen Verkehrsverteilung wurde ein kooperatives Abstimmungskonzept und eine Kommunikationsarchitektur entwickelt um die Kooperation zwischen den Fahrzeugen mit strategischen Informationen aus der Verkehrszentrale zu ergänzen.

Verkehrsmanagement verfolgt das Ziel, Strategien abzuleiten, die auf die Optimierung des gesamten Verkehrssystems abzielen. Der einzelne Verkehrsteilnehmer folgt bei seiner Routenwahl natürlich seinem eigenen Optimum, die Summe davon entspricht allerdings nicht immer dem Gesamtoptimum. Somit ist die Integration bzw. Berücksichtigung dieser Strategien durch Empfehlungen in den Fahrzeugen für das gesamte Verkehrssystem vorteilhaft. Weiterhin können vorhandene Informationen aus der Verkehrszentrale zu Verkehrslage, Baustellen, Unfällen oder Strategien bei Events über V2X direkt in die Fahrzeuge eingebracht werden.

3.5.5.7 Gesamtsystem

Die Funktionalität der IMAGinE-Konzepte wurde erfolgreich in Simulationen und Fahrzeugen dargestellt.

Es ist möglich, dass alle Fahrzeuge der Partner auf beliebige Weise miteinander kooperieren, eine Software bedient alle in die Fahrzeuge integrierten Funktionen und Rollen (kooperationsgewährend und -bedürftig).

3.5.6 AP5.6: Demonstration

Das AP5.6 verfolgte das Ziel, Planung, Vorbereitung und Durchführung der technischen Demonstration partnerübergreifend zu realisieren. Das AP5.6 zeichnete dabei für die technische Planung und Realisierung verantwortlich. Die organisatorische Vorbereitung und Durchführung der Veranstaltung war in AP6.2 angesiedelt. Zwischen beiden Arbeitspaketen fand eine enge Abstimmung statt.

Die Arbeitsschwerpunkte von AP5.6 lagen auf der

- Erstellung eines Demonstrationskonzepts und einer technischen Spezifikation
- Planung der Demonstration
- Auswahl eines Demonstrationsgeländes bzw. einer Demonstrationsstrecke zur Durchführung der Demonstration

- Durchführung der Vorbereitungsworkshops
- Durchführung der Projektdemonstration

Ausgehend von den erarbeiteten Funktionen sowie den technischen Spezifikationen wurden in AP5.6 Szenarien zur Demonstration der kooperativen Manöverassistenz erarbeitet. Im Rahmen der Abschlussdemonstration wurden neben den Konzepten der kooperativen Manöverautomatisierung und virtuellen Demonstratoren die Funktionen in realen Testfahrzeugen gezeigt. Dabei dienten die in TP1 definierten Funktionen und Use Cases als Ausgangspunkt für die Spezifikation der Demonstrationsszenarien. Die Szenarien wurden im Rahmen der Planung und Vorbereitung der Demonstrationen in einen Anforderungskatalog und eine Spezifikation umgesetzt.

Die Demonstrationsplanung basierte auf den Erkenntnissen der vorherigen Arbeitspakete zur Spezifikation von Use Cases, die zur Umsetzung vorbereitet wurden.

Basierend auf der Planung wurden sowohl die virtuellen als auch die realen Demonstrationsumgebungen vorbereitet. Bei den virtuellen Demonstrationen wurden u.a. die MMI-Simulatoren für die Kommunikation und Präsentation von Projektergebnissen umgerüstet und mobilisiert. Die Konzepte wurden auf die Demonstratoren übertragen und um Elemente erweitert, die für die Demonstration notwendig wurden. Gleiches gilt für Software-in-the-Loop und Verkehrssimulationen. Zur Umsetzung realer Demonstrationsszenarien wurden Demonstrationsumgebungen geschaffen, die eine Umsetzung und Demonstration der Funktionen im Realfahrzeug erlauben.

Es war geplant, die Demonstration im Rahmen der Abschlussveranstaltung auf einem gemeinsam genutzten Testgelände zu absolvieren, um zusätzliche Aufwände zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden bei der Auswahl des Testgeländes auch veranstaltungsspezifische Anforderungen berücksichtigt, z.B. vorhandene Räume, Flächen, technische Infrastruktur und Dienstleisternetzwerk zur Umsetzung eines Vortragsprogramms und einer Ausstellung. Die Vorbereitung der Demonstration erfolgte im Rahmen von Validierungsworkshops. Hier wurde die Umsetzung der Demonstration erprobt, um die Funktionalität der Systemkomponenten, wie beispielsweise Fahrzeug oder Kommunikationssysteme, sicherzustellen. Im Hinblick auf die Fahrdemonstrationen mit Teilnehmern der Abschlussveranstaltung wurde eine Choreographie entwickelt und erprobt.

Gesamtkonzeption

Die Demonstration der Projektergebnisse war gemäß ursprünglicher Planung im Rahmen einer physischen Abschlussveranstaltung vorgesehen. Vor dem Hintergrund der seit Frühjahr 2020 bestehenden Gefährdungslage durch Corona und der Unsicherheit über die zum Projektende im Mai 2022 bestehende Risikolage, stand v.a. das Veranstaltungskonzept im Fokus der Planungsphase. Es wurden mehrere Optionen identifiziert und im Partnerkreis diskutiert. Resultierend aus den Überlegungen zur bestmöglichen Umsetzung des Projektabschlusses, unter Abwägung des Gefährdungspotenzials einerseits und der Möglichkeit einer umfänglichen Ergebnispräsentation andererseits, entschied sich das Konsortium zu einer Zerteilung der Abschlusspräsentation in eine virtuelle und eine physische Veranstaltung.

Virtuelle Abschlusspräsentation

Die virtuelle Abschlusspräsentation fand am 12.05.2022 statt. Mehr als 300 Gäste aus Industrie, Forschung und der öffentlichen Hand nahmen an der Online-Veranstaltung teil. Im Fokus dieser Veranstaltung stand die Vorstellung der Projektergebnisse anhand von Vorträgen. Hierzu präsentierten Expertinnen und Experten aus dem Projekt Arbeiten und Ergebnisse in mehreren thematischen Sessions entlang der fünf Kerninnovationen, die in IMAGinE untersucht wurden: Kooperative Manöverabstimmung, Kooperatives Umfeldmodell, Kommunikationsmechanismen, Mensch-Maschine-Interaktion und Simulationsumgebung.

Im Anschluss an die Fachvorträge folgte eine Zusammenfassung der wichtigsten, in IMAGinE erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse: Alle entwickelten IMAGinE-Systeme erwiesen sich als funktionsfähig für die Mobilität von morgen. Damit wurde in IMAGinE ein wichtiger Meilenstein zum kooperativen Fahren der Zukunft erreicht.

Des Weiteren hatten die Teilnehmenden in fünf parallel stattfindenden Diskussionsforen Gelegenheit, direkt mit den Projektpartnern weitere Aspekte der Projektarbeit zu besprechen und zu diskutieren.

Den Teilnehmenden wurde begleitend auf der Veranstaltungsplattform Projektmaterial zur Verfügung gestellt, z.B. die in IMAGinE umgesetzten Projektfilme, Poster mit partnerspezifischen Themen und eine Ergebnisbroschüre.

Ergebnispräsentation in Pferdsfeld

Eine Woche nach der virtuellen Abschlusspräsentation präsentierte das IMAGinE-Konsortium am 19.05.2022 die Ergebnisse seiner Forschungsarbeit in einer Präsenzveranstaltung auf dem TRIWO-Testcenter Pferdsfeld in Rheinland-Pfalz. Im Mittelpunkt der eintägigen Veranstaltung standen mit Fahrdemonstrationen und einer umfangreichen Ausstellung das direkte Erlebnis der in IMAGinE entwickelten Konzepte und Komponenten zur kooperativen Manöverabstimmung. Diese wurden während der Laufzeit anhand von konkreten Fahrfunktionen und Anwendungsfällen sowohl in Simulationen als auch in realen Pkw und Lkw auf Landstraßen und Autobahnen untersucht. Dazu wurden zehn reale Versuchsfahrzeuge ausgerüstet und auf verschiedenen Testgeländen erprobt – darunter auch das TRIWO-Testcenter Pferdsfeld.

Anhand der Fahrdemonstrationen konnten sich die rund 100 Teilnehmer ein eigenes Bild über die Praxistauglichkeit der IMAGinE-Systeme machen. Demonstriert wurden die IMAGinE-Funktionen F1 (Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen), F4 (Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung) und F5 (Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen) sowie das kooperative Umfeldmodell. Daneben demonstrierten einzelne Partner unterschiedliche Simulationsmethoden, u.a. Vehicle-in-the-Loop.

In einer umfassenden Ausstellung präsentierten sich alle Partner und stellten ihre Arbeiten und Ergebnisse anhand von Postern, Präsentationen und Simulationen vor. Auch hier kam der Erlebniswert nicht zu kurz. So konnten Besucher am Stand der Technischen Universität München in

einem Fahrsimulator intuitive Konzepte der Mensch-Maschine-Interaktion für kooperatives Fahren selbst erfahren.





Abbildung 62: Abschlussveranstaltung auf dem TRIWO-Testgelände in Pferdsfeld (Fotos: IMAGinE-Konsortium)

3.5.7 Zielerreichung

Durch die dokumentierten Arbeiten des Teilprojekts 5 konnte anhand der Evaluation des IMAGinE-Systems mit den verschiedenen Konzepten der IMAGinE-Partner eine Gesamtbewertung stattfinden. Diese wurde in den sogenannten „Kernaussagen“ zusammengefasst.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die aus der IMAGinE-Basisidee entstandenen Konzepte mit den entsprechenden Umsetzungen aus den Teilprojekten 1-4 in den Arbeitspaketen AP5.2, AP5.3 und AP5.4 erfolgreich evaluiert werden konnten. Mit allen Konzepten konnten in Simulation und/oder im Fahrzeug erfolgreich Kooperationen anhand der verschiedenen Funktionen durchgeführt werden. Die Projektpartner haben aus ihren Simulationsergebnissen für die aus GUA1 verfügbare Implementierung und für die partnerspezifischen Algorithmen erfolgreich Anpassungen abgeleitet und das System in den folgenden Arbeitspaketen stetig weiterentwickelt. Des Weiteren wurden die Funktionen als Basis für die Evaluation erfolgreich umgesetzt. Die beantworteten Untersuchungsgegenstände dienten final zur Formulierung der Kernaussagen.

Die in TP5 erarbeiteten Evaluationen und die daraus resultierenden IMAGinE-Ergebnisse wurden bei den IMAGinE-Abschlussveranstaltungen im Mai 2022 präsentiert bzw. demonstriert.

3.6 TP6: Projektmanagement

Zielsetzung

Teilprojekt 6 hatte eine querschnittliche Rolle innerhalb des Projektes IMAGinE. Die Hauptaufgabe dieses TP bestand darin, sowohl organisatorische als auch technisch-inhaltliche Schnittstellen unter den einzelnen Partnern und Arbeitspaketen zu schaffen und zu pflegen. TP6 gliederte sich in zwei Arbeitspakete, die Management- und Koordinationsaufgaben (AP6.1) sowie die Ergebnisverbreitung (AP6.2) umfassten. TP6 wurde von der Opel Automobile GmbH geleitet und von einem Projektbüro unterstützt.

Mit seinen Arbeiten verfolgte TP6 folgende Ergebnisse:

- Erreichung der übergeordneten Projektziele innerhalb des vereinbarten Budget- und Zeitrahmens
- Koordination der Arbeiten aller Partner
- Management der administrativen, technischen und finanziellen Aufgaben des Projektes
- Identifikation von potenziellen Risiken und Abweichungen sowie Definition und Umsetzung geeigneter Gegenmaßnahmen
- Sicherung der Qualität der zu erstellenden Deliverables
- Schaffen von Schnittstellen zu externen Stakeholdern
- Verbreitung der Projektergebnisse
- Koordination der Projektpräsentationen

Das Projektbüro leistete die operative Koordination und unterstützte bei der Kommunikation nach innen und außen. Die Einbindung des Projektbüros erfolgte als gemeinsamer Unterauftrag durch alle Projektpartner. Dabei bildeten die durch das Projektbüro wahrgenommenen Projektmanagement- und Koordinationsaufgaben den gemeinsamen Unterauftrag GUA8 und die Leistungen zur Projektkommunikation den GUA9.

3.6.1 AP6.1: Management und Koordination

AP6.1 umfasste das Management und die Koordination des Gesamtprojekts und war über den gesamten Projektzeitraum hinweg aktiv. Die Hauptaktivitäten und zentralen Ergebnissen dieses Arbeitspakets lagen bei folgenden Inhalten:

- Definition von Standards und Prozessen für die gemeinsame Zusammenarbeit im Konsortium, z.B. hinsichtlich Rollen und Verantwortlichkeiten, Berichtswesen, Qualitätssicherung und Freigabeprozessen. Diese wurden zu Projektbeginn in Deliverable D6.1 (Projekthandbuch) dokumentiert. Die Einhaltung der definierten Prozesse wurde während der Projektlaufzeit überwacht und ggf. angepasst.

- Etablierung der internen Kommunikation, insbesondere Einrichtung und Pflege von Mail-verteiltern sowie der Einrichtung, dem Betrieb und der Pflege der im Konsortium genutzten Projektmanagement-Plattform Confluence für kollaboratives Arbeiten.
- Planung, Organisation, inhaltliche Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung eines Konsortialtreffens am 26.10.2017 im Center for Entrepreneurship in Garching bei München. Die Veranstaltung hatte zwei Schwerpunkte: Am Vormittag wurden die bisher erreichten Zwischenergebnisse in den einzelnen Teilprojekten und die weiteren anstehenden Aufgaben präsentiert. Am Nachmittag wurden mit Workshop-Charakter fünf Schwerpunktthemen präsentiert und in Arbeitsgruppen vertieft. Ziel war es, die bisherigen Ergebnisse dieser zentralen Themen vorzustellen, die bevorstehenden Arbeiten zu diskutieren und bei allen Beteiligten ein gemeinsames Verständnis zu erzeugen. Dies wurde durch Vorträge und Präsentationen der Themenverantwortlichen sowie Poster und Simulationen erreicht und ermöglichte insbesondere neuen Projektmitarbeitenden die Gewinnung eines guten Überblicks über das bisher Erreichte und die anstehenden Aufgaben.
- Inhaltliche Überwachung des Projektfortschritts und Projektsteuerung sowie Aktualisierung und Harmonisierung von Arbeitsplänen unter Beachtung der Gesamtzieelerreichung.
- Qualitätssicherung von Deliverables und Lastenheften
- Koordination des Berichtswesens gegenüber dem Fördermittelgeber und Projektträger
- Planung, Organisation, Moderation, Dokumentation von regelmäßigen Treffen auf Projektmanagement- und Steuerkreisebene sowie Aufgabenverfolgung
- Während der akuten Gefährdungslage durch COVID-19 ab Frühjahr 2020 wurden durch die Projektleitung in AP6.1 zunächst die Frequenz des partnerübergreifenden Austausches auf wöchentliche Telefonkonferenzen erhöht. Diese Maßnahme diente der Erfassung der Arbeitsfähigkeit der einzelnen Partner, da in diesem Zeitraum Arbeiten an den Testfahrzeugen und gemeinsame Workshops anstanden. Die Meetingfrequenz wurde später entspannt; eine wöchentliche Erfassung der Arbeitssituation wurde dennoch bis zum Projektabschluss beibehalten.
- Zentrales Dokumentenmanagement

AP6.1 war für die Deliverables D6.1 (Projekthandbuch), D6.4 (gemeinsamer Schlussbericht) und D6.5 (StK-/PMT-Treffen und -Telkos) verantwortlich.



Abbildung 63: Konsortialtreffen 2017 in Garching (Fotos: Mario Druse, EICT)

3.6.2 AP6.2: Ergebnisverbreitung

AP6.2 Ergebnisverbreitung konzentrierte sich auf die Kommunikation des Projektes nach außen und gliederte sich in die Aufgabenbereiche Ergebnisverbreitung und Koordination von Projektpräsentationen. Die Hauptaufgabe der Ergebnisverbreitung bestand in der zielgruppengerechten Aufbereitung und Zurverfügungstellung von relevanten Projektinformationen durch geeignete Kommunikationsmittel. Die Koordination von Projektpräsentationen umfasste die Koordination der IMAGinE-eigenen Veranstaltungen Kick-off und Abschlusspräsentation. AP6.2 hat das Projekt als Querschnittsaufgabe während der gesamten Laufzeit begleitet.

Die Hauptaktivitäten und -ergebnisse des AP6.2 umfassten folgende Themen und werden im Folgenden näher beschrieben:

- Entwicklung und Pflege eines Kommunikationsplans
- Konzeption von Basisinstrumenten der Kommunikation in deutscher und englischer Sprachversion
- Konzept und Entwurf einer Standardpräsentation
- Implementierung und Durchführung von Pressearbeit
- Zentraler Ansprechpartner im Projekt für Kommunikation
- Konzept und Realisierung von Projektfilmen
- Organisation der Kick-off-Veranstaltung
- Organisation der Abschlusspräsentation

Entwicklung und Pflege eines Kommunikationsplans

Der Kommunikationsplan bildete die Grundlage der gesamten Projektkommunikation. Darin wurden die für die Kommunikation der Projektergebnisse und -ereignisse notwendigen Inhalte, Formate, Mittel und Maßnahmen in den Grundzügen beschrieben. Die Entwicklung des Kommunikationsplans diente dem Ziel, die Ergebnisverbreitung in IMAGinE effizient und qualitativ hochwertig zu gestalten – sowohl aus Gesamtprojektsicht als auch für jeden einzelnen der zwölf Projektpartner. Im Kommunikationsplan wurden folgende Themen definiert:

- Kommunikationsstrategie: Definition von Zielgruppen, Zielen, zentralen Themen und Kernbotschaften der Ergebnisverbreitung von IMAGinE
- Projektidentität: Darlegung von visuellen Elementen und deren Anwendung bei einzelnen Kommunikationsinstrumenten
- Kommunikationskanäle und -instrumente: Darstellung von Basisinstrumenten der Online- und Offline-Kommunikation als aktive Pfeiler der Projektkommunikation
- Rollen, Verantwortlichkeiten, Prozesse
- Evaluierung der Projektkommunikation

Der Kommunikationsplan wurde als Deliverable D6.3 dokumentiert und im Projektverlauf turnusmäßig hinsichtlich seiner Aktualität geprüft und bedarfsgerecht überarbeitet.

Entwicklung einer Projektidentität

Zum Projektstart stand neben der Entwicklung eines Kommunikationsplans die Schaffung einer Projektidentität im Fokus der Arbeiten von AP6.2. Mit der Projektidentität wurden die grundlegenden visuellen Elemente eines einheitlichen Darstellungsbildes geschaffen, welches sowohl nach außen als auch nach innen identitätsstiftend wirkt und ein Wir-Gefühl im Konsortium er-

zeugen konnte. Die visuellen Elemente Projektlogo, Farb- und Schriftwelt, die grafische Darstellung der Kerninnovationen sowie zentrale Projektgrafiken bildeten die Projektidentität von IMAGinE.

Tabelle 16: Elemente der IMAGinE-Projektidentität

Logo	 IMAGinE	
Schriftarten	Alwyn™ New	Regular <i>Regular Italic</i> Bold
Farben		

Konzeption von Basisinstrumenten der Kommunikation

Aufbauend auf dem Kommunikationsplan und den Elementen der Projektidentität wurden die Basisinstrumente der Kommunikation entwickelt. Dazu zählten:

- Zentrale Projektgrafiken u.a. zu den in IMAGinE verfolgten Kerninnovationen und den sechs kooperativen Funktionen

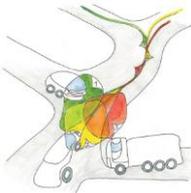
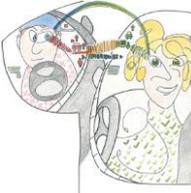
- Templates für Berichte, Deliverables und Präsentationen
- Standardpräsentation mit Folien zur Vision und Motivation, zum technologischen Ansatz, den kooperativen Funktionen, den Kerninnovationen sowie zum Konsortium und der Projektstruktur
- Website als zentraler Kanal für die externe Kommunikation mit Basisinformationen zum Projekt, seiner Struktur und Vorgehensweise sowie aktuellen Informationen zu Projektergebnissen und -ereignissen, Publikationen und Informationsmaterialien
- Projekt-Fact Sheet mit Basisinformationen zur Vision und den Zielen von IMAGinE, den kooperativen Funktionen, dem Konsortium und Kennzahlen zum Projekt

Bis auf Templates wurden sämtliche Materialien sowohl in deutscher als auch englischer Sprachversion erstellt.

Zentrale Projektgrafiken

Neben der TP-/AP-Struktur, entlang derer sich die Inhalte des Vorhabens IMAGinE beschreiben ließen, wurden in IMAGinE auch sogenannte Kerninnovationen definiert. Diese erstreckten sich über die Teilprojekte hinweg und wurden initial zur Beschreibung der mit dem Vorhaben intendierten Innovationssprünge (qualifiziert entlang von Technologiereifegraden) entwickelt. Dieses Konzept wurde im Berichtszeitraum aufgenommen und weiterentwickelt, da sie sich einerseits zur Strukturierung und Impulssetzung der inhaltlichen Themen über TPs und APs hinweg eigneten. Zum anderen ließ sich – im Hinblick auf die Außenkommunikation – mit den Kerninnovationen auch eine zentrale inhaltliche Zugangsebene etablieren. Anhand und entlang der fünf definierten Kerninnovationen ließen sich die wissenschaftlich-technologischen Beiträge von IMAGinE und die damit verbundenen Innovationssprünge gut darstellen und kommunizieren.

Tabelle 17: Visualisierung der IMAGinE-Kerninnovationen

Kooperative Manöverabstimmung	Kooperatives Umfeldmodell	Kommunikationsmechanismen	Mensch-Maschine-Interaktion	Simulationsumgebung
				

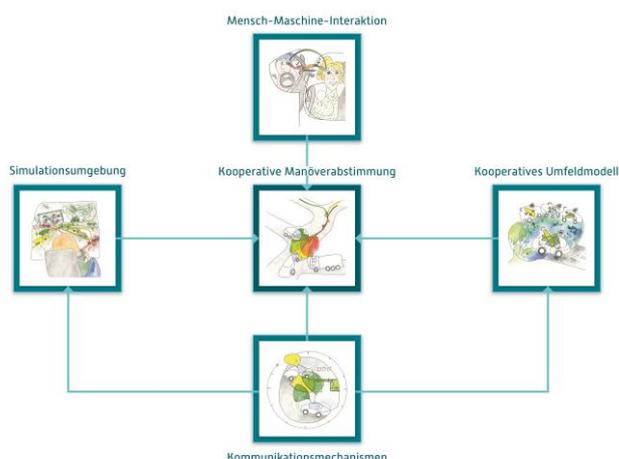


Abbildung 64: IMAGinE-Kerninnovationen

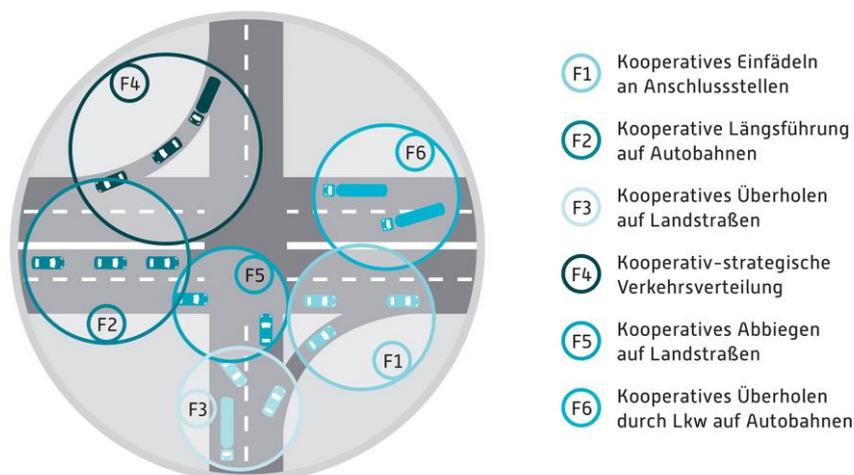


Abbildung 65: Kooperative Funktionen in IMAGinE

Projekt-Website

Die Projekt-Website bildete den hauptsächlichen Kanal zur externen Kommunikation in IMAGinE. Hierüber wurde die interessierte Öffentlichkeit über Projektziele, -inhalte und -ergebnisse informiert. Über die Website wurden im Projektverlauf Informationsmaterialien zum Download bereitgestellt, z.B. mehrere Deliverables, Broschüren und Pressemitteilungen.

Bereits kurz nach Projektstart wurde unter der URL www.imagine-online.de eine erste statische Website freigeschaltet, die zunächst lediglich über die Projektziele informierte. Am 09.08.2017 konnte die Vollversion in deutscher Sprache und am 20.09.2017 in englischer Sprache live geschaltet werden. Als Teil der Erfolgskontrolle wurde in der Planungsphase auch die Erfassung von Website-Statistiken geplant, z.B. Anzahl der Besucher, Page-Impressions. Auf eine solche Erfassung wurde jedoch im Zuge der Anpassungen des EU-DSGVO und der damit verbundenen höheren Anforderungen an den Datenschutz verzichtet.

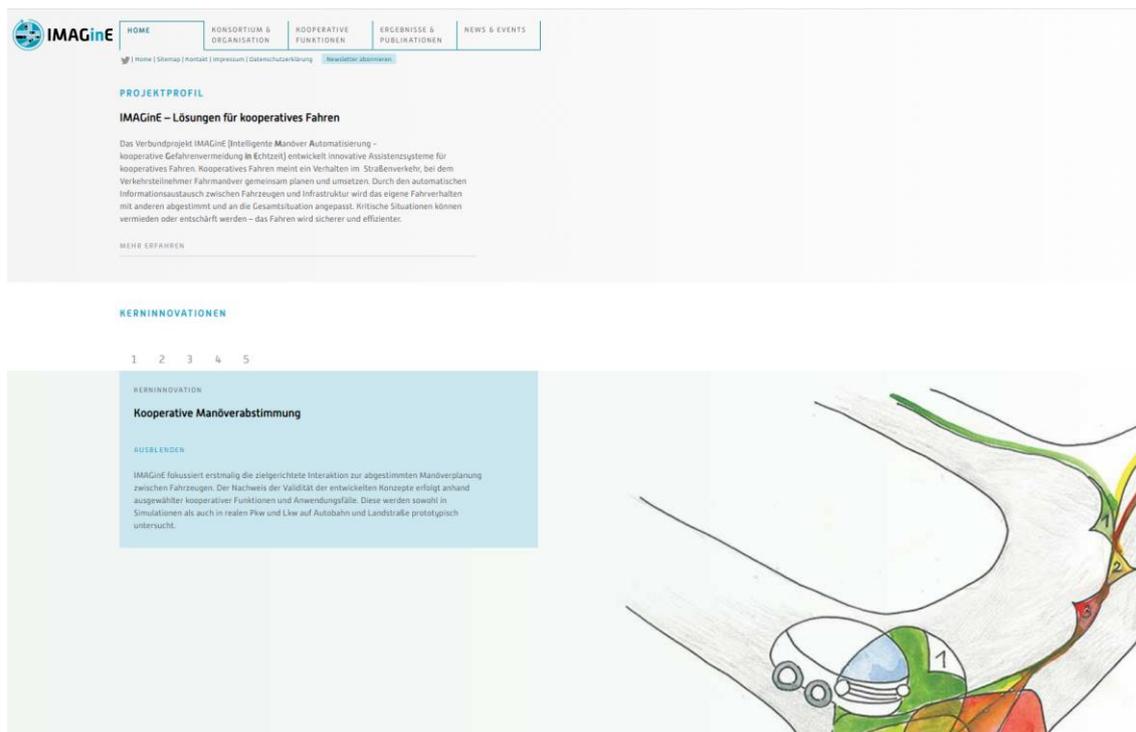


Abbildung 66: Homepage der IMAGinE-Website

Kick-off-Veranstaltung

Im Rahmen des Projektstarts fand vom 29.-30.11.2016 auf dem Bosch-Forschungscampus in Renningen die Kick-off-Veranstaltung von IMAGinE statt. An der Veranstaltung nahmen 74 Mitarbeitende des IMAGinE-Konsortiums, des Fördermittelgebers und des Projektträgers teil.

Die zweitägige Veranstaltung wurde insbesondere genutzt, um ein Kennenlernen der einzelnen Mitarbeitenden zu ermöglichen und ein gemeinsames Verständnis der bevorstehenden Aufgaben im Projektkonsortium zu erzeugen. Dazu wurde der Vorstellung der einzelnen Partner und deren Arbeitsgebieten sowie gemeinsamen Diskussionen und ersten Workshops viel Raum gegeben. Abgerundet wurde der Kick-off durch eine Begleitausstellung, in der einige IMAGinE-Partner bereits die für den Einsatz im Projekt vorgesehenen Methoden und Werkzeuge vorstellten, z.B. WIVW mit einer Fahrsimulation, IPG mit CarMaker oder Nordsys mit der Kommunikations-einheit waveBEE.



Abbildung 67: IMAGinE-Kick-off am 29./30.11.2016 in Renningen (Fotos: Mario Druse, EICT)

Abschlussveranstaltung

Die Demonstration der entwickelten Konzepte zur Manöverabstimmung und technischen Komponenten stand im Mittelpunkt der Abschlusspräsentation. Während AP6.2 v.a. für Planung, Organisation, Gestaltung und Kommunikation der Gesamtveranstaltung verantwortlich war, hatte AP5.6 die Koordination der technischen Demonstration inne (siehe AP5.6: Demonstration). Daher erfolgte die Vorbereitung der Abschlusspräsentation in enger Abstimmung zwischen beiden Arbeitspaketen und mit allen Partnern.

Aufgrund der auch im Frühjahr 2022 weiterhin bestehenden Gefährdungslage durch COVID-19 und unter Abwägung des Gefährdungspotenzials hatte das Konsortium entschieden, die Abschlusspräsentation sowohl als virtuelle als auch als Präsenzveranstaltung zeitlich leicht versetzt durchzuführen. AP6.1 übernahm die Organisation und schuf die passenden Rahmenbedingungen:

Der Fokus der virtuellen Abschlussveranstaltung lag auf der Präsentation von Projektergebnissen in Form von Vorträgen. Die Online-Präsentation fand am 12.05.2022 statt. Mehr als 300 Gäste aus Industrie, Forschung und der öffentlichen Hand nahmen teil. Wesentliche Aufgaben des AP6.2 umfassten:

- Entwicklung eines Programms

- Koordination der inhaltlichen Beiträge der Vortragenden inkl. Reviews und Probevorträge
- Recherche, Beauftragung und Koordination eines Anbieters für Online-Konferenzen inkl. Einrichtung und Gestaltung der Online-Plattform, Erstellung von Regie- und Ablaufplänen, Probedurchläufe mit Partnern
- Einladungs- und Teilnehmermanagement
- Zentrale Anlaufstelle für Referenten und Teilnehmer

Die Ergebnispräsentation fand als physische Veranstaltung am 19.05.2022 auf dem TRIWO-Testcenter in Pferdsfeld statt. Im Mittelpunkt dieser Veranstaltung stand das Erlebnis der Projektergebnisse anhand von Fahrdemonstrationen und in einer umfangreichen Ausstellung sowie der direkte Austausch mit den Projektpartnern. Aufgrund der COVID-19-Situation wurde die Veranstaltung nur für eine begrenzte Anzahl an Gästen geplant, welche durch die Partner direkt eingeladen wurden, um die für sie wichtigen Interessen- und Personengruppen berücksichtigen zu können. Zudem wurde die Regelung getroffen, dass eine Teilnahme an der Veranstaltung nur unter Einhaltung der 3G-Regel (geimpft, getestet, genesen) möglich ist und eine Teilnahme an Fahrdemonstrationen nur unter Einhaltung der 2G+-Regel (geimpft + getestet + Maske im Fahrzeug).

Wesentliche Herausforderung in der Umsetzung der Veranstaltung war, dass die Anforderungen der Fahrdemonstration bestimmend für die Wahl der Veranstaltungsstätte und des Veranstaltungsbereiches waren. Das TRIWO-Testcenter in Pferdsfeld wurde durch die Partner mit Testfahrzeugen ursprünglich als Interimslösung genutzt, wodurch viele Partner einen kürzeren Anreiseweg hatten und somit überhaupt Tests während der Corona-Pandemie möglich waren, da viele Unternehmen aufgrund der Gefährdungssituation sehr restriktive Maßnahmen ergriffen hatten. Die Partner haben sich im Laufe der Workshops an das Gelände gewöhnt („eingefahren“), so dass ein späterer Wechsel wegen der Umgewöhnungsphase vermutlich zu Mehraufwänden geführt hätte. Aus Veranstaltungssicht war das TRIWO-Testcenter nicht der bevorzugte Kandidat, da es vor allem an Anzahl und Größe der im Towergebäude des ehemaligen Flugplatzes vorhandenen Räume und Flächen mangelte. Angesichts der besonderen Umstände wurde im Konsortium eine gemeinsame Lösung gefunden, die allen Interessengruppen gerecht wurde. Als Veranstaltungsbereich wurde der sogenannte Trockenhandlingkurs gemietet. Er umfasste eine weitläufige ebenerdige und betonierte Fläche mit direktem Anschluss an die Fahrbahn sowie einen kleinen Flugzeughangar. Die weitere Infrastruktur musste hingegen zusätzlich beschafft und aufgebaut werden.

Wesentliche Arbeiten des AP6.2 umfassten:

- Konzeption und Realisierung eines Projektfilms zur sachlichen Darstellung des Projektes IMAGinE. Der Projektfilm wurde auf eine Laufzeit von 3 bis 4 Minuten ausgelegt, um die wichtigsten Projektbestandteile, v.a. orientiert an den Kerninnovationen, zu transportieren. Die Umsetzung erfolgte durch eine Filmagentur und unter Mitwirkung aller Projektpartner. Die IMAGinE-Partner trugen neben der Beteiligung an den Dreharbeiten aktiv mit eigens produziertem bzw. bereits vorhandenem Material bei. Ergänzend zum Projektfilm wurden

vier weitere Kurzfilme konzipiert und umgesetzt, welche die Kerninnovation fokussieren: Kooperative Manöverabstimmung, Kooperatives Umfeldmodell und Kommunikationsmechanismen, Mensch-Maschine-Interaktion und Simulationsumgebung. Die Kurzfilme waren jeweils auf eine Laufzeit von 1-2 Minuten ausgelegt. Die Projektfilme sind der Öffentlichkeit zugänglich:

- Gesamtprojektfilm,
deutsch: www.youtube.com/watch?v=NOingDDE7F4,
englisch: www.youtube.com/watch?v=KgeG5RY0dpM
- Kooperative Manöverabstimmung,
deutsch: www.youtube.com/watch?v=wwELooMuIRY,
englisch: www.youtube.com/watch?v=tPFHJ-DEXcU
- Kooperatives Umfeldmodell und Kommunikationsmechanismen,
deutsch: www.youtube.com/watch?v=z7urcQ4utCA,
englisch: www.youtube.com/watch?v=e1cWNCUo6qo
- Mensch-Maschine-Interaktion,
deutsch: www.youtube.com/watch?v=wE8081Y6JTg,
englisch: www.youtube.com/watch?v=73c1ShLWo5k
- Simulationsumgebung,
deutsch: www.youtube.com/watch?v=wNK3wOqh5Ec,
englisch: www.youtube.com/watch?v=U5OzZx0dvG8
- Planung der Veranstaltungsteile mit Partnern: Bühnenprogramm, Ausstellung Fahrde-
monstration und Einteilung der Veranstaltungsbereiche
- Recherche externer Dienstleister für Zeltbau, Technikausstattung, Catering, Mobiliar, mo-
bile WC-Anlage, mobile Corona-Teststation, Wachpersonal
- Aufplanung des Geländes und des Ausstellungsbereichs gemäß Anforderungen und Bedarfe
der Partner und Dienstleister
- Koordination der Ausstellungsplanung inkl. Standplatzierung, -einrichtung und -gestaltung
gemäß den Bedarfen der Partner
- Inhaltliche und grafische Aufbereitung der Ergebnispräsentation in Zusammenarbeit mit
den Partnern
- Schnittstelle zwischen Gesamtorganisation und Team für Fahrdemonstration insbesondere
im Hinblick auf Zeitplan für Fahrdemos, Anzahl der Gäste pro Fahrzeug (Durchsatz an Passa-
gieren) und Harmonisierung mit dem Gesamtzeitplan sowie Restriktionen aufgrund der
Corona-Pandemie
- Konzeption und Realisierung von Informationsmaterialien zum Projektabschluss bzw. zur
Ergebniskommunikation: Projektfilme, Ergebnisbroschüre, Roll-up-Poster

- Verfassen einer gemeinsamen Pressemitteilung zum Projektabschluss inkl. Abstimmung innerhalb der projekteigenen Pressegruppe
- Konzeption und Umsetzung von veranstaltungsbezogenen Materialien, z.B. Roll-up-Poster, Banner, Wegweiser, Einladungs- und Programmflyer, Namensschilder, Give Aways.
- Koordination aller Veranstaltungsteile und Akteure vor Ort



Abbildung 68: Abschlussveranstaltung am 19.05.2022 in Pferdsfeld (Foto: IMAGinE-Konsortium)



Abbildung 69: Informationsmaterial zum Projektabschluss : Projektfilme, Ergebnisbrochüre, Roll-up-Poster

3.6.3 Zielerreichung

Das TP6 Projektmanagement nahm eine querschnittliche Aufgabe im Projekt wahr. Die übergeordnete Aufgabe, sowohl organisatorische als auch technisch-inhaltlich Schnittstellen unter den Partnern und Arbeitspaketen zu schaffen, wurde erreicht. Im Arbeitspaket AP6.1 Management und Koordination wurden die Grundlagen, Prozesse und Werkzeuge geschaffen und begleitet bzw. bereitgestellt und gepflegt, die eine institutionsübergreifende Zusammenarbeit in einem Forschungsverbund ermöglichten. AP6.2 Ergebnisverbreitung hat die Außenkommunikation von IMAGinE erfolgreich gestaltet. dies zeigt sich u.a. durch die Entwicklung einer Projektidentität mit Wiedererkennungswert, Darstellung von Projektinhalten in unterschiedlichen, hochwertigen Formaten zur Information relevanter Interessengruppen - z.B. durch Internetpräsenz, Brochüren, Poster, Film - und die Abschlussveranstaltung zur Technologiepräsentation.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Im Verbundprojekt IMAGinE (Intelligente Manöver Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit) arbeiteten von September 2016 bis Mai 2022 zwölf Partner aus Automobilindustrie, Forschung sowie dem Straßenbetrieb an der Entwicklung neuer, innovativer Assistenzsysteme für das kooperative Fahren der Zukunft. Durch die Kommunikation von Fahrzeugen zur gemeinsamen Abstimmung von Fahrmanövern wird der Verkehrsfluss optimiert, damit Verkehrsteilnehmer sicherer, effizienter und entspannter ans Ziel kommen und so die Vision des unfallfreien Fahrens Realität werden kann.

Fahrerinnen und Fahrer werden zunehmend durch technische Systeme unterstützt, die sicherheitsrelevante Empfehlungen direkt an sie kommunizieren oder selbst deren Umsetzung übernehmen. Dabei findet bisher kein Abgleich der Empfehlungen oder Handlungen zwischen verschiedenen Fahrzeugen statt und sie werden auch nicht aufeinander abgestimmt. Um diese Lücke zu schließen, wurden im Forschungsprojekt IMAGinE die Grundlagen für eine kooperative Manöverplanung sowohl zwischen Fahrzeugen als auch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur erforscht und herstellerübergreifende Systeme entwickelt, die nun implementiert werden können.

Das Projektteam untersuchte fünf Themenbereiche: Kooperative Manöverabstimmung, Kooperatives Umfeldmodell, Kommunikationsmechanismen, Mensch-Maschine-Interaktion und Simulationsumgebung. Alle entwickelten IMAGinE-Systeme erwiesen sich als funktionsfähig für die Mobilität von morgen, womit ein wichtiger Meilenstein zum kooperativen Fahren der Zukunft erreicht werden konnte.

Koordinierte Entscheidungsfindung durch kooperative Manöverabstimmung

Um Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern zu ermöglichen, wurden im Projekt IMAGinE erstmalig zielgerichtete Interaktionen zur abgestimmten Manöverplanung zwischen Fahrzeugen untersucht und Basiskonzepte zur kooperativen Manöverabstimmung entwickelt. Diese nutzen aktuell verfügbare Technologien, wie etwa Vehicle-to-Everything (V2X) Kommunikation, um Informationen zu beabsichtigten Fahrmanövern auszutauschen und Abstimmungen nach definierten Regeln durchzuführen. Die Konzepte wurden anhand verschiedener Fahrfunktionen sowohl in Simulation als auch in realen Pkw und Lkw auf geschlossenen Testgeländen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit kooperativer Manöverabstimmung viele Verkehrssituationen deutlich sicherer und komfortabler bewältigen lassen.

Größerer Überblick durch kooperatives Umfeldmodell

Das unmittelbare Umfeld eines Fahrzeugs wird durch verbaute Sensorik erfasst, wie zum Beispiel Kameras, Radare und LiDAR-Systeme. Solche Lösungen können jedoch an ihre natürlichen Grenzen stoßen, wenn die Umgebung schlecht einsehbar oder die Wahrnehmung beeinträchtigt ist. IMAGinE erweiterte die Sensorsicht der einzelnen Verkehrsteilnehmer, indem Informationen vieler Kooperationspartner per V2X-Technologie ausgetauscht und zu einem individuell erweiterten Umfeldmodell zusammengefasst wurden. Auf diese Weise konnte ein umfassenderes Bild

der Gesamtsituation entstehen. Das Prinzip dahinter: „Sehen mit den Augen der anderen.“ In IMAGinE wurde ein solches kooperatives Umfeldmodell erstmalig als Basis für kooperative Manöverabstimmung entwickelt und in Versuchsfahrzeugen verschiedener Hersteller integriert. Es führte bereits in dieser ersten Implementierung zu einem deutlichen Informationsgewinn und erhöhte die Wahrnehmung des umgebenden Verkehrsgeschehens. So konnten für bordautonome Sensoren verdeckte Objekte dennoch frühzeitig erkannt werden. Auch Verkehrsteilnehmer, die nicht in der Lage sind, sich aktiv über V2X mitzuteilen, können frühzeitig erkannt werden.

Neue Kommunikationsmechanismen

Die für das kooperative Fahren notwendigen Informationen werden durch den Versand von V2X-Nachrichten zwischen Fahrzeugen untereinander und mit der entsprechenden straßenseitigen Infrastruktur ausgetauscht. Für die Realisierung der in IMAGinE untersuchten kooperativen Fahrfunktionen, wurden im Projekt mehrere neue Nachrichtenformate definiert: Die „Maneuver Coordination Message“ (MCM) dient der Abstimmung kooperativer Fahrmanöver, indem Trajektorien – geplante Wegstrecken – zwischen benachbarten Fahrzeugen ausgetauscht und verhandelt werden. Mit der „IMAGinE Driving Strategy Message“ (IDSM) werden zusätzliche Nachrichten, die für einige Funktionen notwendig sind, zwischen Verkehrsteilnehmern ausgetauscht, um eine strategische Manöverabstimmung zu ermöglichen. Im Projekt IMAGinE kam dieses Nachrichtenformat vor allem bei der Funktion für kooperatives Überholen von Lkw auf Autobahnen zum Einsatz. Die „IMAGinE Traffic Distribution Message“ (ITDM) wurde entwickelt, um kollektive Strategien aus dem Verkehrsmanagement in lokale kooperative Abstimmungen zwischen einzelnen Fahrzeugen zu integrieren. Dies dient dem Ziel, das Verkehrsaufkommen im Straßennetz optimal zu verteilen und dadurch das Potenzial für einen sicheren und effizienten Verkehrsfluss zu schaffen. Die neuen Nachrichtenformate wurden bereits während der Projektlaufzeit hinsichtlich ihrer Standardisierbarkeit untersucht.

Anwenderzentrierte Mensch-Maschine-Interaktion

Eine zentrale Herausforderung für die Zukunft liegt in der Entwicklung verständlicher und intuitiver Assistenzkonzepte, die Fahrerinnen und Fahrer zu kooperativem Verhalten motivieren. In IMAGinE wurden verschiedene Aspekte kooperativen Fahrverhaltens in mehreren Probandenstudien im Fahrsimulator untersucht und Lösungsvorschläge für intuitive Konzepte der Mensch-Maschine-Interaktion für das kooperative Fahren vorgestellt. Die Studienergebnisse zeigen, dass die Probanden eine Assistenz zur Unterstützung kooperativen Fahrens akzeptieren und bei Verwendung passender Anzeige- und Bedienkonzepte als einfach und sicher erleben. Die Studienergebnisse mündeten in einer Reihe von Erkenntnissen und Leitlinien für die benutzergerechte Gestaltung von Anzeige- und Bedienkonzepten für kooperative Fahrerassistenzsysteme. Die in IMAGinE entwickelten Funktionen werden den Verkehrsteilnehmern auf intuitive Weise ermöglichen, sich im Straßenverkehr kooperativ und partnerschaftlich zu verhalten. Dies eröffnet die Chance, die Verkehrssicherheit weiter zu erhöhen. In IMAGinE wurden somit die Grundlagen für

eine anwenderzentrierte Mensch-Maschine-Interaktion für das kooperative und partnerschaftliche Fahren geschaffen.

Getestet in Simulation und Realfahrzeugen

In IMAGinE wurden kooperative Fahrfunktionen entwickelt, die mehrere Fahrzeuge für eine gemeinsame Lösungsfindung einbeziehen. Die Komplexität kooperativer Gesamtsysteme steigt mit der Anzahl der Verkehrsteilnehmer und potenzieller Kooperationspartner. Daher war die Simulation von der frühen Konzept- und Entwicklungsphase bis hin zur Integration in die realen Fahrzeuge fester Bestandteil eines reproduzierbaren und gefahrlosen Testens auch von kritischen Situationen.

Die Projektpartner entwickelten eine flexible und modulare Simulationsarchitektur, welche die Untersuchung kooperativer Manöver mehrerer Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Die so entstandenen Simulationen wurden projektbegleitend sowohl zur Entwicklung der kooperativen Manöverabstimmung als auch für partnerspezifische Softwarekomponenten eingesetzt.

Die in der Simulation getesteten kooperativen Fahrfunktionen wurden schließlich in zehn reale Versuchsfahrzeuge integriert und in mehr als 20 gemeinsamen Workshops auf verschiedenen Testgeländen erprobt. Durch umfangreiche Tests konnten die Partner erfolgreich eine durchgehende Funktionalität der kooperativen Manöverabstimmung in unterschiedlichen Szenarien und Partnerkonstellationen erreichen. Die Fahrzeuge der Partner können so beliebig austauschbar miteinander kooperieren.

ANHANG 1: LITERATURVERZEICHNIS

- [1] CAR 2 CAR Communication Consortium, „Memorandum of Understanding for OEMs within the CAR 2 CAR Communication Consortium on Deployment Strategy for cooperative ITS in Europe,“ 2011.
- [2] CAR 2 CAR Communication Consortium, „Aktualisierung zum Memorandum of Understanding,“ 2015.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“,“ 2015.
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, „Neue Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland,“ 2014.
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan),“ 2012.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Bundesministerium des Innern, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), „Digitale Agenda 2014-2017,“ 2014.
- [7] Bundesregierung, „Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung,“ 2002.
- [8] J. Van der Laan, A. Heino und D. De Waard, „A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics.,“ *Transportation Research - Part C: Emerging Technologies*, pp. 1-10, 1997.
- [9] B. Laugwitz, T. Held und M. Schrepp, Construction and evaluation of a user experience questionnaire., Springer, 2008.
- [10] J. Brooke, „SUS: a „quick and dirty? usability scale.,“ in *Usability Evaluation in Industry*, London, Taylor and Francis, 1996, pp. 189-194.
- [11] Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Die neue Hightech-Strategie. Innovationen für Deutschland,“ 2014.

ANHANG 2: ÜBERSICHT DER ÖFFENTLICHEN DELIVERABLES

Jedes Arbeitspaket wurde mit einem Deliverable abgeschlossen. Folgende Deliverables sind öffentlich verfügbar.

ID	Titel	Fertigstellung
D1.1	Einordnung kooperativer Funktionen	17.05.2017
D1.2	Use-Case-Analyse	31.07.2017
D1.3	Harmonisierung der Anforderungen	21.07.2017
D2.5	Spezifikation kooperativer Manöverplanung und Systemarchitektur <i>Specification of Cooperative Maneuver Coordination and System Architecture</i>	13.04.2022
D3.1	Spezifikation und Implementierung kooperatives Umfeldmodell	21.06.2021
D6.2	Internetauftritt	Statische Website: 29.11.2016 Dynamische Website: 09.08.2017
D6.4	Gemeinsamer Schlussbericht	30.11.2022

ANHANG 3: VERÖFFENTLICHUNGEN

2016

Andres, P.; Knapp, S.: Intelligent Maneuver Automation – cooperative hazard avoidance in realtime (IMAGinE). Car2Car Forum 2016, Gaydon, Warwickshire, UK,, 26.10.2016 (Vortrag)

2017

Fank, J.; Knies, C.; Diermeyer, F.; Prasch, L.; Reinhardt, J.; Bengler, K.: Akzeptanzfaktoren kooperativer Assistenzsysteme – eine zweistufige Studie zur Untersuchung der Kooperation im Straßenverkehr. 8. Fachtagung Fahrerassistenz, München, 22.-23.11.2017 (Vortrag)

Fank, J.; Knies, C.; Diermeyer, F.; Prasch, L.; Reinhardt, J.; Bengler, K.: Factors for user acceptance of cooperative assistance systems. A two-step study assessing cooperative driving. In: Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik / TÜV-SÜD-Akademie München (Hrsg.): 8. Fachtagung Fahrerassistenz, München, 22.-23.11.2017 (Tagungsband)

Günther, H.-J.: Connected automated driving. International VDI Conference 2017 „Digital Infrastructure & Automotive Mobility“, Berlin, 05.-06.07.2017 (Vortrag)

Kwoczek, A.: Intelligente Manöver Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit (IMAGinE), Kick-off „5G-NetMobil“, Hildesheim, 02.03.2017 (Vortrag)

Maag, C.; Kraft, A.-K.; Neukum, A.: Gemeinsam zum eigenen Ziel – Durch kooperative Fahrerassistenz abgestimmte Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern. Kongress „mobilität querdenken“, Nürnberg, 14.11.2017 (Vortrag)

Protzmann, R.: IMAGinE – Virtual Testing of Intelligent Maneuver Automation, SUMO User Conference 2017, Berlin, 08.-10.05.2017 (Vortrag)

TÜV Rheinland Consulting GmbH: IMAGinE – Intelligente Manöver Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit, in: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Forschung und Technologie für automatisiertes und vernetztes Fahren. Aktuelle Projekte 2017, 2017, S. 10

TÜV Rheinland Consulting GmbH: Von der Information zur Kooperation, in: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Fachprogramm Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien. Zwischenergebnisse, 2017, S. 9-11

2018

Fank, J.; Krebs, P.; Diermeyer, F.: Analyse von Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen für die Entwicklung kooperativer Fahrerassistenzsysteme - Kooperationsbereitschaft von Lkw-Fahrern mit und ohne kooperativen Fahrerassistenzsystemen. 34. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren 2018, Wolfsburg, 07.-08.11.2018 (Vortrag)

Lehmann, B.: Intelligent Maneuver Automation – cooperative hazard avoidance in realtime (IMAGinE). 9th ETSI IST Workshop, Berlin, 06.-08.03.2018 (Vortrag)

Llatser Martí, I.; Michalke, T.; Dolgov, M.; Fuchs, H.; Strunck, S.; Grotendorst, T.: IMAGinE: A General Approach for Cooperative Automated Driving. Car2Car Forum 2018, Lelystad, The Netherlands, 20.-21.11.2018 (Vortrag)

Maag, C.; Kraft, A.-K.; Neukum, A.; Baumann, M.: Mensch-Maschine-Interaktion bei manuellem und automatisiertem kooperativen Fahren an Auffahrten und Kreuzungen. 12. Workshop Fahrerassistenzsysteme und Automatisiertes Fahren, Walting (Altmühltal), 26.09.-28.09.2018 (Vortrag & Paper)

Prasch, L.; Geßler, F.; Reinhardt, J.; Bengler, K.: You do the talking. Passengers are happy when the automation decides on cooperation. 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, Maui, Hawaii (USA), 04.-07.11.2018 (Vortrag)

2019

An, N.; Specka, F.: Entwicklung und Test kooperativer Fahrfunktionen in virtueller Umgebung, AAET 2019 - Automatisiertes und vernetztes Fahren, Braunschweig, 06.-07.02.2019

Fank, J.; Santen, L.; Diermeyer, F.: Should we allow them to pass? Increasing cooperation between truck drivers by anthropomorphism. ACM IUI 2019 - 24th International Conference on Intelligent User Interfaces, Los Angeles, USA, 17.-20.03.2019

Fank, J.; Santen, L.; Diermeyer, F.: "Should we allow them to pass?" - Increasing cooperation between truck drivers by anthropomorphism. 10th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE), Washington, D.C., USA, 24.-28.07.2019 (Tagungsband)

Hauenstein, J.; Diermeyer, F.: Cooperative Longitudinal Control for Commercial Vehicles, 9. Tagung Automatisiertes Fahren, München, 21.-22.11.2019 (Paper)

Knies, C.; Fank, J.; Diermeyer, F.: How to Measure Cooperation? Cost Functions for Cooperative Maneuver Planning on Highways, IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC 2019), Auckland, Neuseeland, 27.-30.10.2019 (Paper)

Knies, C.; Götz, V.; Diermeyer, F.: Testszzenarien für kooperative Fahrfunktionen auf Autobahnen. Tagung Automatisiertes Fahren 2019, München, 21.-22.11.2019 (Präsentation)

Kraft, A.-K.; Maag, C.; Baumann, M.: How to support cooperative driving by HMI design? Transportation Research Interdisciplinary Perspectives (3), 2019, S. 1-10 (Paper)

Lizenberg, V.; Knapp, S.; Mannale, R.; Wendel, V.; Köster, F.: Simulationsbasierte Bewertungs- und Vergleichsmethodik für Abstimmungsverfahren in kooperativen Fahrfunktionen. AAET 2019 - Automatisiertes und vernetztes Fahren, Braunschweig, 06.-07.02.2019

Llatser Martí, I.; Michalke, T.; Dolgov, M.; Fuchs, H.; Strunck, S.; Grotendorst, T.: IMAGinE - A General Approach for Cooperative Automated Driving. Vector Connectivity Symposium 2019, Stuttgart, 04.04.2019

Llatser Marti, I.; Michalke, T.; Dolgov, M.; Wildschütte, F.; Fuchs, H.: Cooperative Automated Driving Use Cases for 5G V2X Communication, IEEE 5G World Forum, Dresden, 30.09.2019 (Paper)

Maag, C.; Kraft, A.-K.; Hoffmann, E.; Neukum, A.; Baumann, M.: Evaluation eines Systems zum kooperativen Fahren an Auffahrten und Kreuzungen: Auswirkung von Systemabbrüchen bei automatisierter und manueller Fahrt, 9. Tagung Automatisiertes Fahren, München, 21.-22.11.2019 (Vortrag)

Schiegg, F. A.; Krost, J.; Jesenski, S.; Frye, J.: A novel Simulation-Framework for the Design and Testing of Advanced Driver Assistance Systems, IEEE Vehicular Technology Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 22.-25.09.2019 (Paper)

Strasdat, B.; Form, T.: Digitalisierung des Verkehrssystems: Chances and Challenges. Mobilität findet Stadt - Digitalisierung des Verkehrssystems, Wolfsburg, 29.01.2019

2020

Bischoff, D.; Schiegg, F.; Meuser, T.; Schuller, D.; Dycke, N.; Steinmetz, R.: What Cooperation Costs: Communication Quality and Cooperation Cost for Cooperative Vehicular Maneuvering in Large-Scale Scenarios. 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (Vehits 2020), Prag, Tschechische Republik, 02.-04.05.2020 (Paper)

Bischoff, D.; Schiegg, F.; Meuser, T.; Steinmetz, R.: Impact of Imperfect Communication on Cooperative Vehicular Maneuvering at Intersections. 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference: VTC2020-Spring, Antwerpen, Belgien, 25.-28.05.2020 (Paper)

Eiermann, L.; Bühler, N.; Breuel, G.; Radosch, I.; Hauswirth, M.: Trajectory Based Motion Planning for On-Ramp Merging-Situations Considering Extended Evaluation Criteria. 2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2020), Cluj-Napoca, Rumänien

Eiermann, L.; Wirthmüller, F.; Massow, K.; Breuel, G.; Radosch, I.: Driver Assistance for Safe and Comfortable On-Ramp Merging Using Environment Models Extended through V2X Communication and Role-Based Behavior Predictions. 2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2020), Cluj-Napoca, Rumänien

Knies, C.; Diermeyer, F.: Data Driven Test Scenario Generation for Cooperative Maneuver Planning on Highways. Applied Sciences 10 (22), 2020, 8154

Kraft, A.-K.; Maag, C.; Baumann, M.: Comparing dynamic and static illustration of an HMI for cooperative driving. Accident Analysis & Prevention 144, September 2020, 105682 (Paper)

Kraft, A.-K.; Maag, C.; Cruz, M.; Baumann, M.; Neukum, A.: The effect of visual HMIs of a system assisting manual drivers in manoeuvre coordination in system limit and system failure situations. Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour 74, Oktober 2020, S. 81-94 (Paper)

Kraft, A.-K.; Maag, C.; Cruz, M.-I.; Baumann, M.; Neukum, A.: Effects of explaining system failures during maneuver coordination while driving manual or automated. *Accident Analysis & Prevention* 148, Dezember 2020, 105839 (Paper)

Lizenberg, V.; Büchs, B.; Knapp, S.; Mannale, R., Köster, F.: Graphical Data Visualization for Vehicular Communication Systems in Real and Virtual Test Environments. *AmE 2020 – Automotive meets Electronics*, Dortmund, 10.-11.03.2020 (Paper)

Mertens, J.C.; Erb, D.; Kraus, S.; Diermeyer, F.: ITS-G5 Antenna Position on Trucks. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Las Vegas, NV, USA, 20.-23.09.2020

Mertens, J.C.; Hauenstein, J.; Kraus, S.; Diermeyer, F.: Reduced Safety Distance for Cooperative Truck Overtaking. *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monaco, 10.-12.09.2020

Mertens, J.C.; Jahn, L.; Hauenstein, J.; Kraus, S.; Diermeyer, F.: Cooperative Truck Overtaking on Freeways. *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monaco, 10.-12.09.2020

Mertens, J.C.; Knies, C.; Diermeyer, F.; Escherle, S.; Kraus, S.: The Need for Cooperative Automated Driving. *Electronics* 2020, 9, 754

Mertens, J.C.; Kraus, S.; Diermeyer, F.: The Urge of Cooperative Driving. Preventing Automated Vehicles from becoming Selfish. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Las Vegas, NV, USA, 23.-26.06.2020 (Paper)

2021

Bischoff, D.; Schiegg, F.A.; Meuser, T.; Schuller, D.; Steinmetz, R.: Adaptive Heterogeneous V2X Communication for Cooperative Vehicular Maneuvering, in: Klein, C.; Helfert, M.; Berns, Gusikhin, O. (Hrsg.): *Smart Cities, Green Cities, and Intelligent Transport Systems*. 9th International Conference SMARTGREENS 2020, and 6th International Conference VEHITS 2020, Prag, Tschechische Republik, 02.-04.05.2021, Revised Selected Papers, Springer International Publishing (Conference paper)

Bischoff, D.; Schiegg, F.A.; Schuller, D.; Lemke, J.; Becker, B.; Meuser, T.: Prioritizing Relevant Information: Decentralized V2X Resource Allocation for Cooperative Driving. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 135630-135656, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3116317 (Journal paper)

Fank, J.; Knies, C.; Diermeyer, F.: After You! Design and Evaluation of a Human Machine Interface for Cooperative Truck Overtaking Maneuvers on Freeways. *13th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 09.-10. & 13.-14.09.2021, <https://doi.org/10.1145/3409118.3475139> (Conference paper)

Hauenstein, J.; Gromer, J.; Mertens, J.C.; Diermeyer, F.; Kraus, S.: Collective Perception: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks. *7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*, 28.-30.04.2021 (Vortrag)

Hauenstein, J.; Mertens, J.C.; Diermeyer, F.; Zimmermann, A.: Cooperative- and Eco-Driving: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks on Hills. *Electronics - Special Issues „Intelligent Transportation Systems (ITS), Volume II“*, <https://doi.org/10.3390/electronics10192373>

Kraft, A.-K.: Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern – Entwicklung und Evaluation von HMI-Konzepten zur Unterstützung kooperativen Fahrens. Universität Ulm, 2021 (Dissertation)

Lizenberg, V.; Alkurdi, M.R.; Eberle, U.; Köster, F.: Intelligent Co-Simulation Framework for Cooperative Driving Functions. 2021 IEEE 17th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, Cluj-Napoca, Rumänien, 28.-30.-09.2021 (Conference paper)

Lizenberg, V.; Bischoff, D.; Haridy, Y.; Eberle, U.; Knapp, S.; Köster, S.: Simulation-Based Evaluation of Cooperative Maneuver Coordination and Its Impact on Traffic Quality. SAE World Congress Experience (WCX) Digital Summit 2021, 13.-15.04.2021 (Vortrag)

Lizenberg, V., Bischoff, D., Haridy, Y., Eberle, U. et al., „Simulation-Based Evaluation of Cooperative Maneuver Coordination and Its Impact on Traffic Quality“, *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility* 3(6):3159-3169, 2021, <https://doi.org/10.4271/2021-01-0171>. (Technical Paper)

Mertens, J.C.; Hauenstein, J.; Diermeyer, F.; Zimmermann, A.: Strategic Coordination of Cooperative Truck Overtaking Maneuvers. 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS), 28.-30.04.2021 (Vortrag)

2022

Maag, C., Kraft, A.-K., Neukum, A., & Baumann, M.: Supporting cooperative driving behaviour by technology – HMI solution, acceptance by drivers and effects on workload and driving behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 84, 2022, 139-154 (Paper)

Gabriel, M.: How behaviour prediction enables mutual respect in autonomous vehicles. 33rd IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Aachen, 05.-09.06.2022 (Vortrag)

ANHANG 4: ERSTMALIG IN IMAGINE DEFINIERTE NACHRICHTENFORMATE

4.1 Maneuver Coordination (MC) Service

4.1.1 Motivation und Beschreibung

Der *Maneuver Coordination Service* dient im IMAGinE-System dazu, die sog. Manöverabstimmung, also das Austauschen und Verhandeln von künftigen Trajektorien zwischen benachbarten Fahrzeugen, zu realisieren. Da zurzeit keine standardisierte V2X-Nachricht zum Austausch von künftigen Trajektorien existiert, wird in IMAGinE die neue Nachricht „Maneuver Coordination Messages (MCM)“ spezifiziert und umgesetzt. Die MCM enthält im Wesentlichen eine Trajektorienliste des Ego-Fahrzeugs, die im Modul „Manöverplanung und -abstimmung“ generiert wird.

Der spezifizierte MC Service ist als Input für die derzeitigen Standardisierungsaktivitäten bei der ETSI (Maneuver Coordination Service im Technical Committee ITS, Working Group 1) eingeflossen.

4.1.2 Spezifikation und Profiling des Services

4.1.2.1 Funktionsbeschreibung und Spezifikation

Der MC Service ist eine Facility Layer Instanz, welche das Senden und Empfangen von MCMs steuert. Innerhalb des ITS-G5 Netzwerkes werden MCMs vom Sender an das direkte Umfeld gesendet, als Single-Hop Broadcast über das ETSI GeoNetworking Protokoll. Die Reichweite des direkten Umfeldes sowie die Frequenz der Generierung von MCMs wird maßgeblich von der Qualität des Übertragungskanal, der Kanallast, der Positionsänderung und Geschwindigkeit der Station gesteuert. Im IMAGinE-System werden die MCMs im KOP-Modul generiert. Das COM-Modul leitet die auf dem entsprechenden Topic empfangenen Messages an die waveBEE weiter und begrenzt die Senderate auf 10 Hz, um den V2X-Kommunikationskanal nicht zu überlasten. Die MCM-Generierungsregeln wurden als Teil der Untersuchung der kooperativen Manöverabstimmung im GUA 4 erstellt.

4.1.2.2 Übersicht über die Nachrichtenstruktur

Dieser Typ beinhaltet eine V2X-Botschaft zur Manöverabstimmung zum Versenden per Funk. Die entsprechende Nachricht innerhalb des IMAGinE-Systems wird in Datentyp `T_ManeuverCoordinationMessage` spezifiziert. Dieser Typ beinhaltet eine V2X-Botschaft zur Manöverabstimmung zum Versenden per Funk. Die entsprechende Nachricht innerhalb des IMAGinE-Systems wird in Datentyp `T_ManeuverCoordinationMessage` spezifiziert. Die folgende Abbildung stellt die Struktur des Nachrichtenformates detailliert dar. Zur Flexibilität verwendete String-Felder vom Typ UTF8 String können später bei Bedarf durch bandbreiteneffizientere Datentypen ersetzt werden. Ihr Anteil an der Nachrichtengröße liegt bei der aktuell geplanten Verwendung

voraussichtlich unter 5%, max. 10%. Im Gegenzug besteht ein hohes Maß an Flexibilität, ohne dass die ASN.1 Kodierung nach Verfahrensanpassungen mit angepasst werden muss.

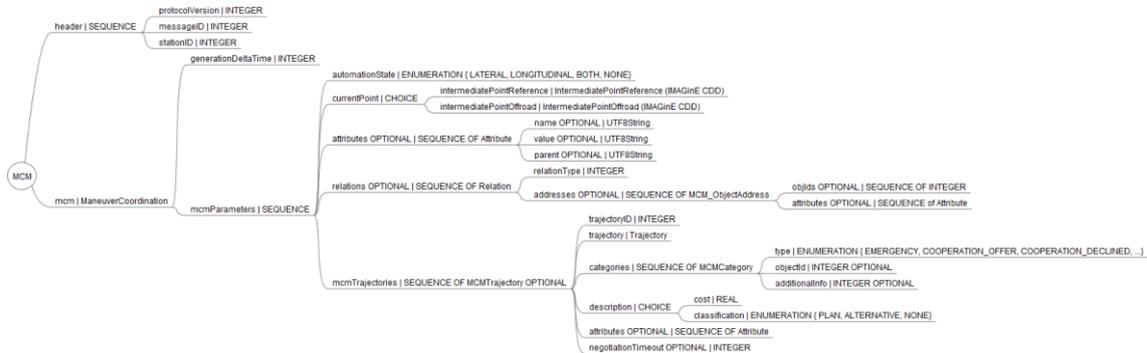


Abbildung 70: Struktur der Maneuver Coordination Message

Die benötigten Datenelemente für die unterschiedlichen Ansätze der Manöverabstimmung werden in der folgenden Tabelle erläutert:

Data Element / Name der Variable		PrelmgVW201609 Wunschtrajekto- rie	Img2018 Kostenba- siert	OpelCore2018 Fahrtrajekto- rie	OpelAlt- Traj2018 Zögertrajekto- rie	Bbasic2019 Interopera- bel	BBB2019 Bewegungsberei- che	
automationState		X	X	(X)	(X)	(X)	(X)	
currentPoint		X	X	X	X	X	X	
attributes		-	-	-	-	X	X	
relations		-	-	-	-	X	X	
mcmTrajec- tories	trajectoryID	X	X	(X)	X	-	X	
	trajectory	X	X	X	X	-	X	
	categories	X	X	(X)	(X)	-	X	
	descrip- tion	cost	-	X	Y	-	-	Y
		classifica- tion	X	-	Y	X	-	Y
	attributes	-	-	-	-	-	-	X
	negotiationTimeout	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	-	(X)

Legende:

X: wird genutzt

-: wird nicht genutzt

(X): optional / unbekannt

Y: wird alternativ genutzt

4.1.2.3 MC Message

Die folgenden Tabellen stellen die Beschreibungen der Datenfelder der Maneuver Coordination Message dar.

Die Strukturbezeichnungen sind grün hervorgehoben, Datentypen sind hellblau bzw. gelb markiert und werden in den nachfolgenden Tabellen detailliert beschrieben.

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
header		ItsPduHeader					A.114	
mcm		ManeuverCoordination						

4.1.2.3.1 ManeuverCoordination

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
generationDeltaTime		INTEGER	0	65535	ms	1		Zeitstempel der MCM-Generierung. Das Fahrzeug befindet sich in diesem Zeitpunkt auf dem currentPoint.
mcmParameters		SEQUENCE						
automationState		INTEGER	0	4	N/A	N/A		0: Das Fahrzeug fährt manuell. 1: Das Fahrzeug fährt längs-automatisiert (z.B. Tempomat).

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
								2: Das Fahrzeug fährt quer-automatisiert (z.B. Lane-keeping). 3: Das Fahrzeug fährt längs- und quer-automatisiert. 4: Automatisierungsgrad unbekannt.
attributes	X	SEQUENCE	1	16				Für die Manöverkooperation relevante Attribute des sendenden Fahrzeugs (unabhängig von den Trajektorien).
attribute		ATTRIBUTE						
relations	X	SEQUENCE	1	16				Kooperationsbezüge zu anderen Fahrzeugen.
relation		RELATION						Kooperationsbezug zwischen Ego und anderen Fahrzeugen.
currentPoint		CHOICE						
intermediatePointReference		INTERMEDIATE_POINT_REFERENCE						Beschreibt den Startpunkt des Fahrzeuges, wenn es sich auf einem Straßennetz befindet.
intermediatePointOffroad		INTERMEDIATE_POINT_OFFROAD						Beschreibt den Startpunkt des Fahrzeuges, wenn es sich nicht auf einem Straßennetz befindet (z.B. Parkplatz).
mcmTrajectories	X	SEQUENCE	1	10				

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
mcmTrajectory		SEQUENCE						
trajectoryID		INTEGER	0	65535	N/A	N/A		Fahrzeug-eindeutige ID der Trajektorie, wird vermutlich gebraucht um explizite Kooperationszusagen/-absagen adressieren zu können.
trajectory		TRAJECTORY						Beschreibt den Trajektorienverlauf ausgehend vom <i>currentPoint</i> .
categories		SEQUENCE	1	10				
mcmCategory		MCM_CATEGORY						
description		CHOICE						
cost		INTEGER	-1000	1000	N/A	0.001		Für kostenbasierte Ansätze: (Kooperations-)kosten der Trajektorie, zwischen -1 und 1.
classification		INTEGER	0	2	N/A	N/A		Für nicht-kostenbasierte Ansätze: 0 (PLAN): Fahrzeug-Solltrajektorie (Plantrajektorie, Idealtrajektorie, ...) 1 (ALTERNATIVE): Andere Trajektorie, die keine Solltrajektorie ist (ansatzspezifisch), z.B. Wunschtrajektorie. 2 (NONE): Keine Klassifizierung / unbekannt

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
attributes	X	SEQUENCE	1	16				Für die Manöverkooperation relevante Attribute des sendenden Fahrzeugs (pro Trajektorie).
attribute		ATTRIBUTE						
negotiation-Timeout	X	INTEGER	0	8191	ms	1		Die Zeitspanne, die das sendende Fahrzeug zum Aushandeln dieser mcmTrajectory vorgesehen hat. Für diese Zeit stimmt die mcmTrajectory mit der Bezugstrajektorie überein, so dass ein Scheitern der Kooperationsaushandlung möglichst wenig spürbar ist. Die Zeitspanne wird ggf. vom sendenden Fahrzeug mit den folgenden Botschaften verringert.

4.1.2.3.2 Hilfsdatentypen

4.1.2.3.2.1 Datentyp TRAJECTORY

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
intermediatePoints		SEQUENCE	1	10				

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
Intermedi-atePoint		CHOICE						
Interme-diatePoin-tReference		INTERMEDI-ATE_POINT_REFE-RENCE						Beschreibt einen Koordinatenstützpunkt auf einer Straße inklusive einer globalen Positionsangabe (WGS84), ohne Topologie Änderung. Wird als Start und Endpunkt für die intermedia-tePoint-Sequence benötigt. Die WGS84-Position wird für ein MapMatching benötigt. Die genaue Position ergibt sich dann aus der Fahrstreifenangabe, Kartendaten und weiteren Quellen.
Interme-diatePoint-Lane		INTERMEDI-ATE_POINT_LANE						Beschreibt eine Topologieänderung oder einen Spurwechsel entlang des durch die intermediatePoint-Sequence beschriebenen Pfades. Es wird keine globale Positionsangabe verwendet.
Interme-diatePoint-Intersection		INTERMEDI-ATE_POINT_INTER-SECTION						Beschreibt eine Kreuzung entlang des durch die intermedia-tePoint-Sequence beschriebenen Pfades. Es wird keine globalen Positionsangabe verwendet.
Interme-diatePoin-tOffroad		INTERMEDI-ATE_POINT_OFF-ROAD						Beschreibt einen Punkt, der keinen Bezug zu einem Straßennetz hat. Dies kann zum Beispiel der Fall auf einem Parkplatz sein. Diese Beschreibung stützt sich ausschließlich auf Positionierungssysteme wie GPS und daher ist eine höhere Ungenauigkeit zu erwarten.
longitudi-nalPositions		SEQUENCE	1	11				Verlauf der Längsposition über die Zeit $w(t)$ w in [m], t in [s]

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
								<p>Der Verlauf wird abschnittsweise durch Polynome definiert, wobei für jedes Polynom der Abschnitt angegeben wird, für den es gültig ist.</p> <p>Wichtig, dabei ist, dass vom Startzeitpunkt t=0 bis zum Endzeitpunkt eine lückenlose Definition vorliegt.</p> <p>Der gültige Bereich darf mit negativen Werten für w starten im Bereich von Kreuzungen, oder mit positiven, wenn das Fahrzeug steht.</p>
Polynom		POLYNOM						
lateralPositions		SEQUENCE	1	11				<p>Verlauf der Querposition über die Längsposition q(w). Positiv in Fahrrichtung links.</p> <p>q in [m], w in [m]</p> <p>Der Verlauf wird abschnittsweise durch Polynome definiert, wobei für jedes Polynom der Abschnitt angegeben wird, für den es gültig ist.</p> <p>In Lücken in der Definition gilt q = 0</p>
Polynom		POLYNOM						
headings	X	SEQUENCE	1	11				<p>Verlauf des Headings über die Längsposition heading(w)</p> <p>heading in [rad], w in [m]</p>

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
								Der Verlauf wird abschnittsweise durch Polynome definiert, wobei für jedes Polynom der Abschnitt angegeben wird, für den es gültig ist. In Lücken in der Definition gilt heading = 0.
Polynom		POLYNOM						

4.1.2.3.2.2 Datentyp INTERMEDIATE_POINT_REFERENCE

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
referencePosition		ReferencePosition (aus ETSI CDD)					A.124	Referenzposition und Positionsgenauigkeit des Fahrzeugs, wie im ETSI Common Data Dictionary definiert.
lane		SEQUENCE						
lanePosition		LanePosition (aus ETSI CDD)	-1	16	N/A	N/A	A.40	Der genutzte Fahrstreifen an der beschriebenen Stelle. -1=offTheRoad, 0=hardShoulder, 1=outermostDrivingLane (i.e. von rechts), 2=secondLaneFromOutside, usw.

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
laneCount		INTEGER	0	16	N/A	N/A		Anzahl der Fahrstreifen an der beschriebenen Stelle.
timeOfPos		INTEGER	0	65535	second	0.01		Zeitpunkt auf der beschriebenen Trajektorie, an der dieser Punkt erreicht wird (relativ zu <i>generationTime</i>). Die räumliche Position und dann z.B. die Distanz zum vorherigen Punkt kann durch Auswerten der " <i>longitudinalPositions</i> " ermittelt werden.

4.1.2.3.2.3 Datentyp INTERMEDIATE_POINT_LANE

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
lane		SEQUENCE					CDD TS 102 894-2 V1.2.8	Beschreibt auf welchem Fahrstreifen sich das Fahrzeug befindet. Hat zwei Elemente. Die Anzahl der Fahrstreifen und ein Index, auf welchem Fahrstreifen sich das Fahrzeug befindet. Steigt oder reduziert sich die Anzahl der Fahrstreifen im Vergleich zu dem vorherigem beschriebenen <i>intermediatePoint</i> , dann handelt es sich um eine Topologieänderung. Ändert sich nur der Index, dann ist an dieser Stelle ein Spurwechsel geplant.
lanePosition		LanePosition	-1	16	N/A	N/A	A.40	Der genutzte Fahrstreifen an der beschriebenen Stelle. -1=offTheRoad, 0=hardShoulder, 1=outermostDrivingLane (i.e. von rechts), 2=secondLaneFromOutside, usw.

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
		(aus ETSI CDD)					CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
laneCount		INTEGER	0	16	N/A	N/A		Anzahl der Fahrstreifen an der beschriebenen Stelle.
reason	X	INTEGER	-1	2	N/A	N/A		-1=keine, 0=laneOpening, 1=laneClosing, 2=laneChange.
timeOfPos		INTEGER	0	65535	second	0.01		Zeitpunkt auf der beschriebenen Trajektorie, an der dieser Punkt erreicht wird (relativ zu <i>generationTime</i>).

4.1.2.3.2.4 Datentyp INTERMEDIATE_POINT_INTERSECTION

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
leaves		SEQUENCE					CDD TS 102 894-2 V1.2.8	Beschreibt auf welchem Fahrstreifen sich das Fahrzeug beim Verlassen der Kreuzung befindet.
lanePosition		INTEGER	-1	16	N/A	N/A	A.40	Der genutzte Fahrstreifen an der beschriebenen Stelle. -1=offTheRoad, 0=hardShoulder, 1=outermostDrivingLane (i.e. von rechts), 2=secondLaneFromOutside, usw.
laneCount		INTEGER	0	16	N/A	N/A		Anzahl der Fahrstreifen an der beschriebenen Stelle.
leavesHeading		INTEGER	0	3601	degrees	0.1	A.35	

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
timeOfPosEntry		INTEGER	0	65535	second	0.01	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	Zeitpunkt auf der beschriebenen Trajektorie, an dem der Kreuzungsbeginn erreicht wird (relativ zu <i>generationTime</i>).
timeOfPosExit		INTEGER	0	65535	second	0.01		Zeitpunkt auf der beschriebenen Trajektorie, an dem die Kreuzung verlassen wird (relativ zu <i>generationTime</i>). Über die Auswertung der " <i>longitudinalPositions</i> " für <i>timeOfPosEntry</i> und <i>timeOfPosExit</i> kann z.B. die Pfadlänge auf der Kreuzung bestimmt werden.

4.1.2.3.2.5 Datentyp INTERMEDIATE_POINT_OFFROAD

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
referencePosition		ReferencePosition (aus ETSI CDD)					CDD TS 102 894-2 V1.2.8	Referenzposition und Positionsgenauigkeit des Fahrzeugs, wie im ETSI Common Data Dictionary definiert.
timeOfPos		INTEGER	0	65535	second	0.01		Zeitpunkt auf der beschriebenen Trajektorie, an der dieser Punkt erreicht wird (relativ zu <i>generationTime</i>).

4.1.2.3.2.6 Datentyp POLYNOM

Mit Hilfe diesen Typen kann der Verlauf einer Größe „y“ über einer anderen Größe „x“ abschnittsweise durch ein Polynom dargestellt werden. Typischerweise wird dieser Typ verwendet, wenn der vollständige Verlauf von „y“ durch eine Reihe von Segmenten mit jeweils einem Polynom definiert werden soll.

$$y(x) = a_0 + a_1 * (x-x_{\text{Offset}})_0 + a_2 * (x-x_{\text{Offset}})^2 + a_3 * (x-x_{\text{Offset}})^3 + \dots$$

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
							CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
coefficients		SEQUENCE	1	6				Liste der Koeffizienten a_x des Polynoms. Die Länge des Feldes gibt implizit den Grad des Polynoms wieder.
coefficient		REAL			N/A			
start		INTEGER	0	2097151	0.001 meter or seconds			Erster x-Wert für den das Polynom verwendet werden soll. Einheit Meter oder Sekunde, je nach Polynomtyp.
end		INTEGER	0	2097151	0.001 meter or seconds			Letzter x-Wert für den das Polynom verwendet werden soll. Einheit Meter oder Sekunde, je nach Polynomtyp.
xOffset		INTEGER	- 8000000	8000000	0.001 meter or seconds			x-Offset in der o.a. Formel. Einheit Meter oder Sekunde, je nach Polynomtyp.

4.1.2.3.2.7 Datentyp MCM_CATEGORY

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
type		INTEGER	0	4	N/A	N/A	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	Zusatzinformation in Form einer Kategorie 0=Keine Kategorie 1=EMERGENCY: Diese Trajektorie stellt für das Fahrzeug eine Notfalltrajektorie dar 2=COOPERATION_OFFER: Kooperationsangebot an andere Fahrzeuge, für die Bezugstrajektorie entspricht diese Kategorie einer Kooperationszusage 3=COOPERATION_DECLINE: für die Bezugstrajektorie ist diese Kategorie für die adressierten Fahrzeuge als Kooperationsablehnung zu werten 4=...
objectID	X	INTEGER	0	4294967295	N/A	N/A	A.77	<i>stationID</i> des Fahrzeugs, auf die sich die Kategorie bezieht. Wenn die Kategorie kein <i>objectID</i> enthält, bezieht sie sich auf alle Fahrzeuge (z.B. bei Emergency) Um die Komplexität gering zu halten, i. st hier keine Liste von IDs vorgesehen, stattdessen können ggf. mehrere Kategorien gleichen Typs verwendet werden.
additionalInfo	X	INTEGER	0	65535	N/A	N/A		Zusatzinfo, mit einer Bedeutung abhängig von <i>type</i> . Im Wesentlichen für die Kategorien COOPERATION_OFFER, COOPERATION_DECLINE gedacht. Hier hat es die Bedeutung von <i>trajectoryID</i> und kann genutzt werden, um spezielle (Bedarfs-)Trajektorien eines anderen Fahrzeuges adressieren zu können.

4.1.2.3.2.8 Datentyp ATTRIBUTE

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
							CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
name	X	STRING	1	16				Der frei wählbare Name des Attributs. Ist der Name ein Leerstring, entspricht er dem ersten nicht-leeren Namen der vorangegangenen Attribute. Damit sind auch Folgen (Vektoren, 1D-Arrays) einfach übermittelbar.
value	X	STRING	1	16				Optionaler Wert (z.B. auch Parameter bzw. Zahlenwert als String). Leerstring wenn nicht benötigt.
parent	X	STRING	1	16				Optional der Name des übergeordneten Wertes, Leerstring wenn nicht benötigt. Damit sind bei Bedarf Hierarchien abbildbar (ähnlich z.B. einem Dateipfad oder einem ROS-Nachrichtenpfad).

4.1.2.3.3 Datentyp RELATION

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
							CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
relationType		INTEGER	0	3	N/A	N/A		Kooperationsbezug zwischen Ego und anderen Fahrzeugen. Definiert sind: <i>request</i> (0): eine Kooperation wird erbeten. <i>offer</i> (1): eine Kooperation wird angeboten. <i>grant</i> (2): eine Kooperation wird gewährt.

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
							CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
								<i>reject (3)</i> : eine Kooperation wird zurückgewiesen.
objectAddresses	X	SEQUENCE	0	63				Adressierung der Fahrzeuge, mit denen dieser Kooperationsbezug besteht.
objectAddress		MCM_OBJECTADDRESS						

4.1.2.3.3.1 Datentyp MCM_OBJECTADDRESS

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
							CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
objIDs	X	SEQUENCE	1	64				Eindeutige lokale Fahrzeug_IDs der Objektliste. Kommunizierte IDs werden vor dem Versenden in T_ObjectV2xIDs umgewandelt und nach dem Empfang rückgewandelt.
objID		INTEGER	0	4294967295	N/A	N/A		Eindeutige Fahrzeug ID der Objektliste. 0 entspricht dem eigenen Fahrzeug / Ego-Fahrzeug.
attributes	X	SEQUENCE	0	15				Optionale Attribute zur indirekten Adressierung von Objekten.
attribute		ATTRIBUTE						Aktuell definiert sind: <i>Lane</i> : +1 (linker Fahrstreifen von Ego), -1 (rechter Fahrstreifen von Ego)

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values				Reference	Informative Description
			Min value	Max value	Unit	Scale		
							CDD TS 102 894-2 V1.2.8	
								<i>NearLimit</i> : -x (Fahrzeuge weiter als x m hinter Ego) <i>FarLimit</i> : -y (Fahrzeuge näher als y m hinter Ego)

4.2 IMAGinE Driving Strategy (IDS) Service

4.2.1 Motivation und Beschreibung

Für einige kooperative Funktionen müssen, neben den Bezugs- / Alternativ- und Bedarfstrajektorien, noch weitere Daten ausgetauscht werden, um eine strategische (über einen längeren Zeitraum) Manöverabstimmung zu realisieren. Dies wird zum Beispiel für die Synchronisierung von Zustandsautomaten in den Funktionen 2 (Kooperative Längsführung auf Autobahnen) und 6 (Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen) benötigt (Datentyp `T_CooperativeSession`). Zum Beispiel für die Funktion 6: Ein Überholmanöver von zwei Lastkraftwagen kann besser durchgeführt werden, wenn die Geschwindigkeitsprofile der beiden Fahrzeuge über die Überholdauer von bis zu 45 Sekunden untereinander abgestimmt werden.

Im Gegensatz zu Cooperative Awareness (CA) Service, Collective Perception (CP) Service und [Maneuver Coordination \(MC\) Service](#) werden hier Daten übertragen, deren Semantik dem Service selbst nicht bekannt sein muss. Erst die auf die Inhalte zugreifenden Softwaremodule können den Inhalt interpretieren.

4.2.2 Spezifikation und Profiling des Services

4.2.2.1 Funktionsbeschreibung und Spezifikation

4.2.2.1.1 Versenden

Generierungsregel: Die IDS-Nachrichten werden vom Kommunikationsmodul mit einem festen Intervall versendet, sobald eine Distributed State Machine (DSM) aktiviert ist. Diese wird vom Modul Fahrstrategische Abstimmung erstellt, sobald ein potentieller Partner über die reguläre CAM erkannt wurde. Ist eine Session aktiv („`T_CurrentState`“ ungleich null in Datentyp `T_CooperativeSession`), so muss ein fester Intervalltakt von 10 Hz eingehalten werden. Sobald keine aktive Session mehr vorliegt, wird der Takt auf 1 Hz reduziert. Die Generierungsregeln werden im Modul Fahrstrategische Abstimmung umgesetzt. Das Kommunikationsmodul leitet die auf dem entsprechenden Topic empfangenen Messages an die waveBEE weiter und stellt sicher, dass die Senderate zwischen 1 und 10 Hz bleibt.

Es gilt also je nach aktueller Cooperative Session:

- `T_CurrentState` und `T_DesiredState` sind beide null → keine IDS-Nachricht senden
- `T_CurrentState` ungleich null → festes Intervall von IDS
- `T_DesiredState` ungleich null UND `T_CurrentState` = null → freier Takt für IDS

Das Kommunikationsmodul empfängt diese Daten vom KOP-Modul über das Interface KOP-COM, topic `kop/distributed_state`. Die Daten entsprechen dem Datentyp `T_CooperativeSession`.

4.2.2.1.2 Empfangen

Das Kommunikationsmodul befüllt mit den Daten die Typen:

T_CooperativeSession

Das KOP-Modul empfängt die Daten über COM-KOP, topic com/external_distributed_state.

4.2.2.2 Übersicht über die Nachrichtenstruktur

Die folgende Abbildung stellt die Struktur des Nachrichtenformates im Detail dar.

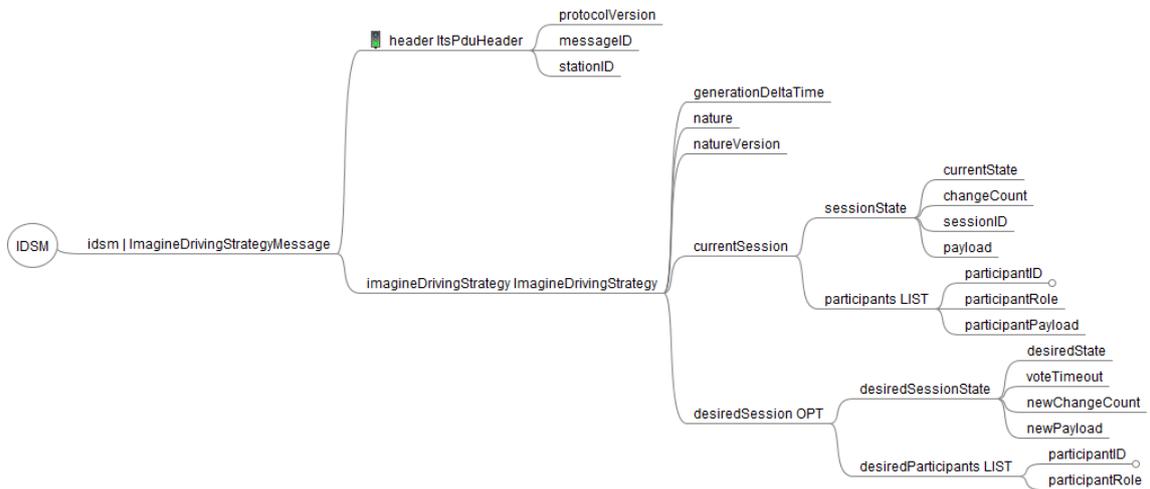


Abbildung 71: Struktur der IMAGinE Driving Strategy Message

4.2.2.3 IDS Message

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values					Reference		Informative Description
			Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
header		SEQUENCE						A.114		
protocolVersion		INTEGER	0	255		N/A	N/A			Protocol version used
messageID		INTEGER	0	255		N/A	N/A			
stationID		INTEGER	0	4294967295		N/A	N/A	A.77		The ITS-S ID may be a pseudonym. It may change over space and/or over time
imaginedDrivingStrategy		ImagineDrivingStrategy								
generationDeltaTime		INTEGER	0	65535		ms	1			Time corresponding to the time of the reference position in the IDSM, considered as time of the IDSM generation. The value of the DE shall be wrapped to 65 536. This value shall be set as the remainder of the corresponding value of TimestampIts divided by 65 536 as below: generationDeltaTime = TimestampIts mod 65 536

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values					Reference		Informative Description
			Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
nature		INTEGER	0	255		N/A			Function identifier - Marks the service which this message is related to. Can be set to non-specific, to distribute non-function-specific data. Values: F1, F2, F3,..., non-specific	
natureVersion		INTEGER	0	255		N/A			Function version used	
currentSession		SEQUENCE							Container to transport session related data.	
sessionState		SEQUENCE							Container to transport information for session negotiation.	
currentState		INTEGER	0	255		N/A			Current function-specific state of the sending participant	
changeCount		INTEGER	0	65535		N/A			Current session change counter (MOD 65535)	
sessionID		INTEGER	0	65535		N/A			unique session ID	
payload		BYTE[]							function-specific payload	
participants		LIST							List of agreed session participants	
participantID		INTEGER	0	255		N/A			stationID of participant	
participantRole		INTEGER	0	255		N/A			agreed function-specific role of participant	

Data Element / Name der Variable	Optional	Type	Physical values					Reference		Informative Description
			Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
participant-Payload		BYTE[]								function-specific payload (from sending vehicle only!)
desiredSession	X	SEQUENCE								Container for state changes
desiredSessionState		SEQUENCE								Container to transport information for session negotiation.
desiredState		INTEGER	0	255			N/A			state to be changed into
voteTimeout		INTEGER	0				ms	1		absolute time after which the negotiation round shall be deleted (failed)
newChangeCount		INTEGER	0	65535			N/A			change Count for new state (MOD 65535)
newPayload		BYTE[]								function-specific payload
desiredParticipants		LIST								List of agreed session participants
participantID		INTEGER	0	255			N/A			stationID of participant
participantRole		INTEGER	0	255			N/A			agreed function-specific role of participant

4.3 IMAGinE Traffic Distribution (ITD) Service

4.3.1 Motivation und Beschreibung

Für die kooperative Funktion F4 müssen zur Realisierung einer gewünschten Verkehrsverteilung an einem Knotenpunkt Informationen zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur ausgetauscht werden. Der ITD Service bietet hierfür sowohl die Möglichkeit, eine von der Verkehrszentrale gewünschte Verteilung zu publizieren (via TrafficDistribution Container), als auch die Möglichkeit, die für den Kooperationsprozess benötigten Daten unter den Fahrzeugen auszutauschen (via Score Container).

4.3.2 Spezifikation und Profiling des Services

4.3.2.1 Funktionsbeschreibung und Spezifikation

Datengenerierung:

1. Support server (SUPS): Die in der Verkehrszentrale erstellte Verteilungsempfehlung (via Traffic Distribution Container) erfolgt zu Zeiträumen und Örtlichkeiten, die eine Aktivierung der F4 (d.h. sinnvolle Eingriffe in die Verteilung des Verkehrs) erfordern. Dies erfolgt auf Basis der in der Verkehrszentrale vorhandenen, zu erweiternden, ortsabhängigen Steuerungsregeln für die Verkehrsumlenkung. Die Verteilung wird nach der Aktivierung der F4 zyklisch einmal pro Minute an die lokale Infrastruktur versandt, bis die F4 wieder beendet wird.
2. Fahrzeug: Der Versand der ITD Message (via Score Container) zwischen den Fahrzeugen im Rahmen des Kooperationsprozesses erfolgt nach Aktivierung der F4 einmal beim Einfahren in den Kooperationsbereich und bei Bedarf einmal beim Ausfahren aus dem Kooperationsbereich. Empfangene ITD Messages werden nur innerhalb des Kooperationsbereiches verarbeitet.

4.3.2.2 Übersicht über die Nachrichtenstruktur

Die folgende Abbildung stellt die Struktur des Nachrichtenformates im Detail dar.

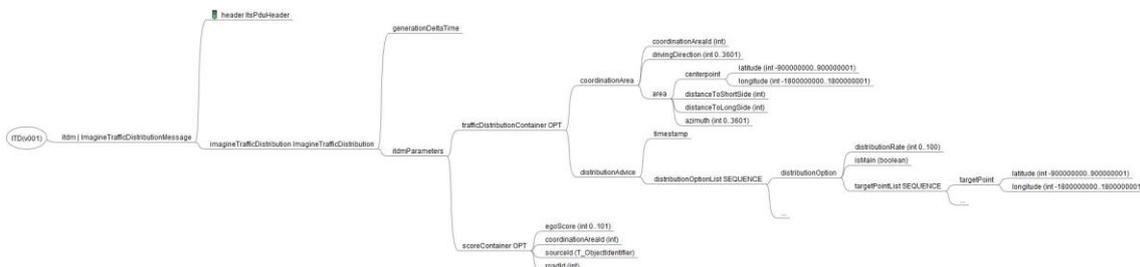


Abbildung 72: Struktur der IMAGinE Traffic Distribution Message

4.3.2.3 ITD Message

Data Element / Name der Variable	Optional	Physical values						Reference		Informative Description
		Type	Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
header		SEQUENCE						A.114		
protocolVersion		INTEGER	0	255		N/A	N/A			
messageID		INTEGER	0	255		N/A	N/A			
stationID		INTEGER	0	4294967295		N/A	N/A	A.77		The ITS-S ID may be a pseudonym. It may change over space and/or over time
imagineTrafficDistribution		SEQUENCE								
generationDeltaTime		INTEGER	0	65535		ms	1			Time corresponding to the time of the reference position in the ITDM, considered as time of the ITDM generation. The value of the DE shall be wrapped to 65 536. This value shall be set as the remainder of the corresponding value of Timestamppls divided by 65 536 as below:

Data Element / Name der Variable	Optional	Physical values						Reference		Informative Description
		Type	Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
										generationDeltaTime = Timestamppls mod 65 536
itdmParameters		SEQUENCE								
TrafficDistributionContainer		SEQUENCE								F4 specific container to transport traffic distribution data. This container is only generated by the infrastructure.
CoordinationArea		SEQUENCE								Information on the coordination area.
coordinationAreaId		INTEGER	0	7						ID of the respected coordination area. Needed to reference overlapping coordination areas.
drivingDirection		INTEGER	0	3601	N/A	degrees	0.1	A.35		Orientation of a heading with regards to the WGS84 north. Specifies that only vehicles with the approximate heading/direction of driving are affected.
area		SEQUENCE								Geometry of the coordination area. Defines a WGS84 rectangular geoarea.

Data Element / Name der Variable	Optional	Physical values						Reference		Informative Description
		Type	Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
centerpoint		SEQUENCE								CenterPoint of the rectangular GeoArea.
Latitude		INTEGER	-900000000	900000001	N/A	micro-degrees	0.1	A.41		Absolute geographical latitude in a WGS84 coordinate system, providing a range of 90 degrees in north or in south hemisphere. Positive values are used for latitude in north of the Equator, negative values are used for latitude in south of the Equator. When the information is unavailable, the value shall be set to 900 000 001.
Longitude		INTEGER	-1800000000	1800000001	N/A	micro-degrees	0.1	A.44		Absolute geographical longitude in a WGS84 co-ordinate system, providing a range of 180 degrees to the east or to the west of the prime meridian. Negative values are used for longitudes to the west, positive values are used for longitudes to the east. When the information is unavailable, the value shall be set to 1 800 000 001.

Data Element / Name der Variable	Optional	Physical values						Reference		Informative Description
		Type	Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
distanceToShortSide		INTEGER	1	65535	N/A	meters	1			Distance from the centerpoint to the short side of the rectangle.
distanceToLongSide		INTEGER	1	65535	N/A	meters	1			Distance from the centerpoint to the long side of the rectangle.
azimuth		INTEGER	0	3601	N/A	degrees	0.1	A.35		Orientation of a heading with regards to the WGS84 north. Defines the orientation of the rectangular geo area with regards to the WGS84 north.
DistributionAdvice		SEQUENCE								Information on the distribution advice.
distributionOptionList		SEQUENCE								List of distribution options.
distributionOption		SEQUENCE								A distribution option defines one choice for the traffic distribution, e.g. staying on the highway or leaving through the exit.
distributionRate		INTEGER	0	100		percent	1			Defines the desired amount of traffic for this route.
isMain		BOOLEAN								Marks a distribution option as the main route. In most scenarios

Data Element / Name der Variable	Optional	Physical values						Reference		Informative Description
		Type	Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
										where there's a highway and an exit, this is the highway.
target-PointList		SEQUENCE								List of target points. Each distribution option contains 1...n target points (corresponding to the target lanes in this distribution option).
target-Point		SEQUENCE								A target point marks the beginning of a lane or road segment, which is the next segment right behind the parting of the ways.
Latitude		INTEGER	-900000000	900000001	N/A	micro-degrees	0.1	A.41		Absolute geographical latitude in a WGS84 coordinate system, providing a range of 90 degrees in north or in south hemisphere. Positive values are used for latitude in north of the Equator, negative values are used for latitude in south of the Equator. When the information is unavailable, the value shall be set to 900 000 001.
Longitude		INTEGER	-1800000000	1800000001	N/A	micro-degrees	0.1	A.44		Absolute geographical longitude in a WGS84 co-ordinate system, providing a range of 180 degrees to

Data Element / Name der Variable	Optional	Physical values						Reference		Informative Description
		Type	Min value	Max value	Default	Unit	Scale	CDD TS 102 894-2 V1.2.8	SAE J2735 JAN2016	
										the east or to the west of the prime meridian. Negative values are used for longitudes to the west, positive values are used for longitudes to the east. When the information is unavailable, the value shall be set to 1 800 000 001.
scoreContainer		SEQUENCE								Transports EgoScore information for the F4 function. Gets generated and sent by vehicles.
egoScore		INTEGER	0	101	N/A	percent	1			Calculated score to indicate the vehicles will stay on the currently selected road. Value 101 shows that the decision to switch route has been made.
coordinatio- nAreald		INTEGER	0	7		number	1			ID of the coordination area this information is related to.
roadId		INTEGER								ID of the currently selected road segment. This iD refers to the UTM- Road IDs used in the IMAGinE system.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht																														
3. Titel IMAGinE Intelligente Manöver Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit																															
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2022																														
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Bickel, Markus</td><td style="width: 50%;">Maag, Christian</td></tr> <tr><td>Bischoff, Daniel</td><td>Mertens, Jan Cedric</td></tr> <tr><td>Breuel, Gabi</td><td>Nagel, Katharina</td></tr> <tr><td>Büchs, Bernd</td><td>Prasch, Lorenz</td></tr> <tr><td>Bürkle, Lutz</td><td>Reinhardt, Jakob</td></tr> <tr><td>Chamoun, Afram</td><td>Schäufele, Bernd</td></tr> <tr><td>Diermeyer, Frank</td><td>Schenkel, Torben</td></tr> <tr><td>Dill, Albrecht</td><td>Schid, Matthias</td></tr> <tr><td>Engel, Monique</td><td>Sevenich, Martin</td></tr> <tr><td>Fank, Jana</td><td>Specka, Fabian</td></tr> <tr><td>Geisler, André</td><td>Steckhan, Lorenz</td></tr> <tr><td>Gläser, Stefan</td><td>Strunck, Sebastian</td></tr> <tr><td>Grotendorst, Thomas</td><td>Wildschütte, Florian</td></tr> <tr><td>Knies, Christian</td><td>Wolf, Maria</td></tr> <tr><td>Llatser Martí, Ignacio</td><td></td></tr> </table>	Bickel, Markus	Maag, Christian	Bischoff, Daniel	Mertens, Jan Cedric	Breuel, Gabi	Nagel, Katharina	Büchs, Bernd	Prasch, Lorenz	Bürkle, Lutz	Reinhardt, Jakob	Chamoun, Afram	Schäufele, Bernd	Diermeyer, Frank	Schenkel, Torben	Dill, Albrecht	Schid, Matthias	Engel, Monique	Sevenich, Martin	Fank, Jana	Specka, Fabian	Geisler, André	Steckhan, Lorenz	Gläser, Stefan	Strunck, Sebastian	Grotendorst, Thomas	Wildschütte, Florian	Knies, Christian	Wolf, Maria	Llatser Martí, Ignacio		6. Veröffentlichungsdatum
Bickel, Markus	Maag, Christian																														
Bischoff, Daniel	Mertens, Jan Cedric																														
Breuel, Gabi	Nagel, Katharina																														
Büchs, Bernd	Prasch, Lorenz																														
Bürkle, Lutz	Reinhardt, Jakob																														
Chamoun, Afram	Schäufele, Bernd																														
Diermeyer, Frank	Schenkel, Torben																														
Dill, Albrecht	Schid, Matthias																														
Engel, Monique	Sevenich, Martin																														
Fank, Jana	Specka, Fabian																														
Geisler, André	Steckhan, Lorenz																														
Gläser, Stefan	Strunck, Sebastian																														
Grotendorst, Thomas	Wildschütte, Florian																														
Knies, Christian	Wolf, Maria																														
Llatser Martí, Ignacio																															
	7. Form der Publikation Schlussbericht																														
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution																														
BMW AG, 80788 München Continental Teves AG & Co oHG, Guerickestraße 7, 60488 Frankfurt am Main Die Autobahn GmbH des Bundes, Heidestraße 15, 10557 Berlin IPG Automotive GmbH, Bannwaldallee 60, 76185 Karlsruhe MAN Truck & Bus SE, Dachauer Straße 667, 80995 München Mercedes-Benz AG, 70546 Stuttgart Nordsys GmbH, Mittelweg 7, 38106 Braunschweig Opel Automobile GmbH, 65423 Rüsselsheim Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Platz 1, 70839 Gerlingen-Schillerhöhe Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München Volkswagen AG, Brieffach 1777, 38436 Wolfsburg Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH, Robert-Bosch-Straße 4, 97209 Veitshöchheim	10. Förderkennzeichen <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 80%;">Opel</td><td style="width: 20%;">19A16003A</td></tr> <tr><td>BMW</td><td>19A16003L</td></tr> <tr><td>Continental</td><td>19A16003E</td></tr> <tr><td>Die Autobahn</td><td>19A16003H</td></tr> <tr><td>IPG</td><td>19A16003D</td></tr> <tr><td>MAN</td><td>19A16003K</td></tr> <tr><td>Mercedes-Benz</td><td>19A16003I</td></tr> <tr><td>Nordsys</td><td>19A16003C</td></tr> <tr><td>Bosch</td><td>19A16003F</td></tr> <tr><td>TU München</td><td>19A16003B</td></tr> <tr><td>Volkswagen</td><td>19A16003J</td></tr> <tr><td>WIVW</td><td>19A16003G</td></tr> </table>	Opel	19A16003A	BMW	19A16003L	Continental	19A16003E	Die Autobahn	19A16003H	IPG	19A16003D	MAN	19A16003K	Mercedes-Benz	19A16003I	Nordsys	19A16003C	Bosch	19A16003F	TU München	19A16003B	Volkswagen	19A16003J	WIVW	19A16003G						
Opel	19A16003A																														
BMW	19A16003L																														
Continental	19A16003E																														
Die Autobahn	19A16003H																														
IPG	19A16003D																														
MAN	19A16003K																														
Mercedes-Benz	19A16003I																														
Nordsys	19A16003C																														
Bosch	19A16003F																														
TU München	19A16003B																														
Volkswagen	19A16003J																														
WIVW	19A16003G																														
	11. Seitenzahl 225																														
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)	13. Literaturangaben 11																														
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 10115 Berlin	14. Tabellen 17																														
	15. Abbildungen 72																														
16. Zusätzliche Angaben																															
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Forschungsmanagement Projektträger Bodengebundene Verkehrstechnologien (PT BVt) Am grauen Stein, 51105 Köln, Nov 2022																															

18. Kurzfassung

In IMAGinE wurde die Erforschung der Grundlagen kooperativer Manöverplanung in fünf Themenbereiche gegliedert

Kooperative Manöverabstimmung

Die entwickelten Konzepte zur kooperativen Manöverabstimmung nutzen verfügbare Technologien, wie Vehicle-to-Everything (V2X) Kommunikation, um kooperative Fahrmanöver zu planen, abzustimmen und durchzuführen.

Kooperatives Umfeldmodell

Die individuelle Fahrzeugsensorik zur Umfelderkennung stößt an ihre Grenzen, wenn die Umgebung schlecht einsehbar oder die Wahrnehmung beeinträchtigt ist. IMAGinE erweiterte die Sensorsicht einzelner Verkehrsteilnehmer, indem Informationen vieler Kooperationspartner über V2X ausgetauscht und zu einem individuell erweiterten Umfeldmodell zusammengefasst werden.

Kommunikationsmechanismen

Im Projekt wurden neue Nachrichtenformate zur Abstimmung kooperativer Fahrmanöver („Maneuver Coordination Message“), zum Nachrichtenaustausch für strategische Manöverabstimmung (z.B. Überholen von Lkw) („IMAGinE Driving Strategy Message“) und für kollektive Strategien, bestehend aus zentralem Verkehrsmanagement und dezentraler Fahrzeugabstimmung („IMAGinE Traffic Distribution Message“) definiert.

Mensch-Maschine-Interaktion

Aspekte kooperativen Fahrverhaltens wurden in Probandenstudien im Fahrsimulator untersucht und Lösungsvorschläge für intuitive Konzepte der Mensch-Maschine-Interaktion für das kooperative Fahren vorgestellt. Die Studienergebnisse mündeten in Leitlinien für die benutzergerechte Gestaltung von Anzeige- und Bedienkonzepten für kooperative Fahrerassistenzsysteme.

Simulationsumgebung

Zur Simulation kooperativer Gesamtsysteme, die aus mehreren, mittels V2X-Kommunikation interagierenden Fahrzeuge bestehen, entwickelten die Projektpartner eine Simulationsarchitektur, die sowohl zur Entwicklung der kooperativen Manöverabstimmung als auch für partnerspezifische Softwarekomponenten eingesetzt wurde.

Die kooperativen Funktionen wurden in zehn Versuchsfahrzeuge integriert und in Workshops erprobt.

19. Schlagwörter

Manöverplanung, Manöverabstimmung, Kooperation, Umfeldmodell, Kommunikationsmechanismen,/Mensch-Maschine-Interaktion, MMI, Simulationsumgebung

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report																														
3. title IMAGinE (Intelligente Manöver Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit) Intelligent Maneuver Automation - cooperative hazard avoidance in realtime																															
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. end of project 31.05.2022																														
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">Bickel, Markus</td><td style="width: 50%;">Maag, Christian</td></tr> <tr><td>Bischoff, Daniel</td><td>Mertens, Jan Cedric</td></tr> <tr><td>Breuel, Gabi</td><td>Nagel, Katharina</td></tr> <tr><td>Büchs, Bernd</td><td>Prasch, Lorenz</td></tr> <tr><td>Bürkle, Lutz</td><td>Reinhardt, Jakob</td></tr> <tr><td>Chamoun, Afram</td><td>Schäufele, Bernd</td></tr> <tr><td>Diermeyer, Frank</td><td>Schenkel, Torben</td></tr> <tr><td>Dill, Albrecht</td><td>Schid, Matthias</td></tr> <tr><td>Engel, Monique</td><td>Sevenich, Martin</td></tr> <tr><td>Fank, Jana</td><td>Specka, Fabian</td></tr> <tr><td>Geisler, André</td><td>Steckhan, Lorenz</td></tr> <tr><td>Gläser, Stefan</td><td>Strunck, Sebastian</td></tr> <tr><td>Grotendorst, Thomas</td><td>Wildschütte, Florian</td></tr> <tr><td>Knies, Christian</td><td>Wolf, Maria</td></tr> <tr><td>Llatser Martí, Ignacio</td><td></td></tr> </table>	Bickel, Markus	Maag, Christian	Bischoff, Daniel	Mertens, Jan Cedric	Breuel, Gabi	Nagel, Katharina	Büchs, Bernd	Prasch, Lorenz	Bürkle, Lutz	Reinhardt, Jakob	Chamoun, Afram	Schäufele, Bernd	Diermeyer, Frank	Schenkel, Torben	Dill, Albrecht	Schid, Matthias	Engel, Monique	Sevenich, Martin	Fank, Jana	Specka, Fabian	Geisler, André	Steckhan, Lorenz	Gläser, Stefan	Strunck, Sebastian	Grotendorst, Thomas	Wildschütte, Florian	Knies, Christian	Wolf, Maria	Llatser Martí, Ignacio		6. publication date
Bickel, Markus	Maag, Christian																														
Bischoff, Daniel	Mertens, Jan Cedric																														
Breuel, Gabi	Nagel, Katharina																														
Büchs, Bernd	Prasch, Lorenz																														
Bürkle, Lutz	Reinhardt, Jakob																														
Chamoun, Afram	Schäufele, Bernd																														
Diermeyer, Frank	Schenkel, Torben																														
Dill, Albrecht	Schid, Matthias																														
Engel, Monique	Sevenich, Martin																														
Fank, Jana	Specka, Fabian																														
Geisler, André	Steckhan, Lorenz																														
Gläser, Stefan	Strunck, Sebastian																														
Grotendorst, Thomas	Wildschütte, Florian																														
Knies, Christian	Wolf, Maria																														
Llatser Martí, Ignacio																															
	7. form of publication Document																														
8. performing organization(s) (name, address) BMW AG, 80788 München Continental Teves AG & Co oHG, Guerickestraße 7, 60488 Frankfurt am Main Die Autobahn GmbH des Bundes, Heidestraße 15, 10557 Berlin IPG Automotive GmbH, Bannwaldallee 60, 76185 Karlsruhe MAN Truck & Bus SE, Dachauer Straße 667, 80995 München Mercedes-Benz AG, 70546 Stuttgart Nordsys GmbH, Mittelweg 7, 38106 Braunschweig Opel Automobile GmbH, 65423 Rüsselsheim Robert Bosch GmbH, Robert-Bosch-Platz 1, 70839 Gerlingen-Schillerhöhe Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München Volkswagen AG, Brieffach 1777, 38436 Wolfsburg Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH, Robert-Bosch-Straße 4, 97209 Veitshöchheim	9. originator's report no.																														
	10. reference no.																														
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 70%;">Opel</td><td style="width: 30%;">19A16003A</td></tr> <tr><td>BMW</td><td>19A16003L</td></tr> <tr><td>Continental</td><td>19A16003E</td></tr> <tr><td>Die Autobahn</td><td>19A16003H</td></tr> <tr><td>IPG</td><td>19A16003D</td></tr> <tr><td>MAN</td><td>19A16003K</td></tr> <tr><td>Mercedes-Benz</td><td>19A16003I</td></tr> <tr><td>Nordsys</td><td>19A16003C</td></tr> <tr><td>Bosch</td><td>19A16003F</td></tr> <tr><td>TU München</td><td>19A16003B</td></tr> <tr><td>Volkswagen</td><td>19A16003J</td></tr> <tr><td>WIVW</td><td>19A16003G</td></tr> </table>	Opel	19A16003A	BMW	19A16003L	Continental	19A16003E	Die Autobahn	19A16003H	IPG	19A16003D	MAN	19A16003K	Mercedes-Benz	19A16003I	Nordsys	19A16003C	Bosch	19A16003F	TU München	19A16003B	Volkswagen	19A16003J	WIVW	19A16003G						
Opel	19A16003A																														
BMW	19A16003L																														
Continental	19A16003E																														
Die Autobahn	19A16003H																														
IPG	19A16003D																														
MAN	19A16003K																														
Mercedes-Benz	19A16003I																														
Nordsys	19A16003C																														
Bosch	19A16003F																														
TU München	19A16003B																														
Volkswagen	19A16003J																														
WIVW	19A16003G																														
	11. no. of pages 225																														
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 10115 Berlin	13. no. of references 11																														
	14. no. of tables 17																														
	15. no. of figures 72																														
16. supplementary notes																															
17. presented at (title, place, date) Forschungsmanagement Projektträger Bodengebundene Verkehrstechnologien (PT BVT) Am grauen Stein, 51105 Köln, Nov 2022																															

18. abstract

In IMAGinE, research into the fundamentals of cooperative maneuver planning was divided into five subject areas

Cooperative maneuver coordination

The concepts developed for cooperative maneuver coordination use available technologies such as vehicle-to-everything (V2X) communications, to plan, coordinate, and execute cooperative driving maneuvers.

Cooperative environment model

Individual vehicle sensors for environment sensing reach their limits when the environment is poorly visible or perception is impaired. IMAGinE extended the sensor view of individual road users by sharing information from many cooperative partners via V2X and combining it into an individually extended environment model.

Communication mechanisms

The project defined new message formats for coordinating cooperative driving maneuvers ("Maneuver Coordination Message"), for message exchange for strategic maneuver coordination (e.g., overtaking trucks) ("IMAGinE Driving Strategy Message"), and for collective strategies consisting of centralized traffic management and decentralized vehicle coordination ("IMAGinE Traffic Distribution Message").

Human-machine interaction

Aspects of cooperative driving behavior were investigated in studies with individuals in driving simulators and proposed solutions for intuitive concepts of human-machine interaction for cooperative driving were presented. The study results led to guidelines for the user-friendly design of display and control concepts for cooperative driver assistance systems.

Simulation environment

To simulate overall cooperative systems consisting of multiple vehicles interacting via V2X communication, the project partners developed a simulation architecture that was used to develop both cooperative maneuver coordination and partner-specific software components.

The cooperative functions were integrated into ten test vehicles and tested in workshops.

19. keywords

maneuver planning, cooperation environment model, communication mechanisms, human-machine interaction, HMI, simulation environment

20. publisher

21. price