



IMAGinE

Partnerspezifischer Schlussbericht Mercedes-Benz AG

Version:	v1.0
Editor:	Dr. Gabi Breuel
Projektkoordination:	Opel Automobile GmbH
Fälligkeitsdatum:	30.11.2022
Erstellungsdatum	30.11.2022
Veröffentlichung:	30.11.2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DOKUMENTENINFORMATION

Dr. Gabi Breuel

738/II, 0.104
Hanns-Klemm-Str. 45
71034 Böblingen
Deutschland

INHALTSVERZEICHNIS

1 Dokumenteninformationen.....	8
1.1 Autoren.....	8
1.2 Kontakt.....	8
2 Abkürzungsverzeichnis.....	9
3 IMAGinE-spezifische Abkürzungen	11
4 Kurzdarstellung.....	12
4.1 Aufgabenstellung.....	12
4.1.1 Vision und Gesamtzielsetzung	12
4.1.2 Einzelziele	15
4.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	19
4.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	26
4.3.1 Projektstruktur	26
4.3.2 Projektzeitplan	28
4.3.3 Kooperative Fahrfunktionen	28
4.3.4 Meilensteine und Deliverables.....	29
4.3.5 Gemeinsame Unteraufträge	30
4.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangslage.....	31
4.4.1 Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	33
4.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	33
4.5.1 European Telecommunications Standards Institute (ETSI).....	33
4.5.2 Car to Car Communication Consortium	34
5 Eingehende Darstellung	35
5.1 TP1: Analyse von Kooperationsszenarien.....	36
5.2 TP2: Kooperative Funktionen und Systemarchitektur.....	39
5.2.1 Reale Verkehrsdatensätze.....	42
5.2.2 Realisierung von Interaktionen von Fahrzeugen	43
5.2.3 Kombination von Funktion F1 und F2	49
5.3 TP3: Kooperative Technologien	50
5.4 TP4: System- und Fahrzeugintegration.....	55
5.4.1 Integration des rollenbasierten Manöverabstimmungskonzepte	55
5.4.2 Simulationsergebnisse	62

5.5 TP5: Evaluierung und Erprobung	66
5.5.1 Evaluation F1	66
5.5.2 Evaluation F2	68
5.6 Veröffentlichungen	77
5.7 Abschlussveranstaltung	78
6 Literaturverzeichnis	82
1 Anlage: Kurzfassung	83
2 Anhang 1: Übersicht der Deliverables	86
3 Anhang 2: Veröffentlichungen	88

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Partnerstruktur in IMAGinE	24
Abbildung 2: Projektstrukturplan.....	26
Abbildung 3: Projektzeitplan.....	28
Abbildung 4: Die IMAGinE-Funktionen im Überblick.....	29
Abbildung 5 Übersicht der Projektmeilensteine.....	30
Abbildung 6 Unfallstatistik auf deutschen Autobahnen	37
Abbildung 7: Unfallvermeidungspotentiale der Funktion F1 (© Car2Car Communication Consortium).....	37
Abbildung 8: Unfallvermeidungspotentiale der Funktion F2 (© Car2Car Communication Consortium).....	38
Abbildung 9: MOSAIC Runtime Infrastructure (RTI).....	39
Abbildung 10: Kooperative Einfädeln mit kooperativem Umfeldmodell und Prädiktion	40
Abbildung 11: PHABMACS Powertrainmodell.....	41
Abbildung 12: Simuliertes Einfädelszenario aus Sicht des Einfädlers.....	41
Abbildung 13: Realdatensatz der RWTH Aachen. Quelle: HighD dataset (www.highd-dataset.com)	42
Abbildung 14: Visualisierung des Realdatensatz HighD In PHABMACS	43
Abbildung 15: Einfädeln ohne Verhaltensanpassung	44
Abbildung 16: Einfädeln mit Verhaltensanpassung reale Fahrzeuge	44
Abbildung 17: Einfädeln mit Verhaltensanpassung simulierte Fahrzeuge	45
Abbildung 18: Setup unserer verwendeten Simulationsumgebung	45
Abbildung 19: Modifikation der Simulationsumgebung.....	46
Abbildung 20: Platooning Szenario 1-3 (© Car2Car Communication Consortium)	47
Abbildung 21: Platooning Szenario 1 (© Car2Car Communication Consortium).....	47
Abbildung 22: Platooning Szenario 2 (© Car2Car Communication Consortium).....	48
Abbildung 23: Platooning Szenario 3 (© Car2Car Communication Consortium).....	49
Abbildung 24: IMAGinE-Umfeldmodellist.....	51
Abbildung 25: Komponenten des IMAGinE-Umfeldmodells.....	54
Abbildung 26: Unterschied Ego-Sicht und Erweitertes Umfeldmodell (© Car2Car Communication Consortium).....	54
Abbildung 27: Abstimmungskonzepte (© Car2Car Communication Consortium)	55
Abbildung 28: Kooperations-Session in der Simulation.....	56
Abbildung 29: Generische Abbildung des Ablaufs der Kommunikationsprozesse.....	57
Abbildung 30: Abstrahierter Ablauf des Kommunikationsprozesses über CMP [7]	58
Abbildung 31: Verteilten Zustandsautomaten.....	59
Abbildung 32: Abstrahierter Zustandsautomat	60
Abbildung 33: Zustandsautomat Platoon	61

Abbildung 34: Zustandsautomaten FM2.....	61
Abbildung 35: Gekoppelte Zustandsautomaten	62
Abbildung 36: Einfädelvorgang in eine Fahrzeugkolonne/Platoon.....	62
Abbildung 37: Möglichkeiten zum Einfädeln in eine Fahrzeugkolonne oder in ein Platoon	63
Abbildung 38: Prädiktion der Rollen als Use-Cases.....	64
Abbildung 39: Trajektorienplanung und -bewertung	64
Abbildung 40: Aufgebaute Session zum Kooperieren.....	65
Abbildung 41: Trajektorienbewertungen der Situation	65
Abbildung 42: PHABMACS Simulation mit Real-Daten	66
Abbildung 43: Detektierte Objekte in Abhängigkeit der v2x-Ausstattungsrate [8]	67
Abbildung 44: Einfädelparameter mit variierender V2X-Ausstattungsrate [8]	67
Abbildung 45: Aufbau Eclipse MOSAIC.....	68
Abbildung 46: PHABMACS zur Verifikation der sieben Verifikationsszenarien	69
Abbildung 47: Aufnahme des roten Fahrzeugs in ein bestehendes Platoon	70
Abbildung 48: Drei Fahrzeuge im Platoon.....	70
Abbildung 49: Streckenabschnitt Girona, simulierter Straßenverkehr	71
Abbildung 50: Raum-zeitlicher Speed-Contour-Plot und Fundamental-Diagramm für kalibrierten Verkehr	72
Abbildung 51: Benachbarte potentiell kommunizierende Fahrzeuge im Bereich des Ego-Fahrzeugs	74
Abbildung 52: PDR für verschiedene Nachrichtentypen (rechte Achse) im Szenario Girona, zusätzlich als Referenz für die Verkehrsdichte die Anzahl der benachbarten Fahrzeuge zum Ego-Fahrzeug (linke Achse)	75
Abbildung 53: Poster Übersicht F1 & F2	79
Abbildung 54: Poster F1 Kooperatives Einfädeln auf Autobahnen.....	80
Abbildung 55: Poster F2 Platooning.....	81

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Mapping der Einzelziele auf die drei Schwerpunktbereiche	19
Tabelle 2: Beiträge zum NFTS-Fachprogramm	20
Tabelle 3: Übersicht der gemeinsamen Unteraufträge	31
Tabelle 4: Durch Applikationen verwendete Nachrichtentypen und ihre Spezifikation	73
Tabelle 5: Parametrierung der Kommunikation	74

1 DOKUMENTENINFORMATIONEN

1.1 Autoren

Dr. Gabi Breuel

Dr. Ulrich Kreßel

Lucas Dahlbock

Dr. Armin Hürland

Dr. Ilja Radusch

Kay Massow

Bernd Schäufele

Robert Protzmann

1.2 Kontakt

Dr. Gabi Breuel

738/II,0.104

Hanns-Klemm-Str. 45

71034 Böblingen

Deutschland

2 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Begriff
ADFT	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
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
EEBL	Emergency Electronic Break Light (Notbremsung)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F	Kooperative Funktion
FGW	Framework2Framework Gateway
GPS	Global Positioning System
gPTP	generalized Precision Time Control
GUA	Gemeinsamer Unterauftrag
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
KOP	Kooperative Manöverplanung und -abstimmung
L2	Level 2 (automatisiertes Fahren)
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)

Abkürzung	Begriff
MCM	Maneuver Coordination Message
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MS	Meilenstein
NDS	Navigation Data Standard
NTP	Network Time Protocol
OMNeST++	Objective Modular Network Testbed in C++
ROS	Robot Operating System
SDK	Software Development Kit
SUMO	Simulation of Urban MObility
SUPS	Strategischer Support
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
Veins	Vehicles in Network Simulation
VHB	Vorhabenbeschreibung
ViL	Vehicle-in-the-Loop

3 IMAGINE-SPEZIFISCHE ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Begriff
COM	Kommunikationsmodul: Schnittstelle zur waveBEE
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	Framework 2 Framework Gateway
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 in einem Umfeldmodell
GUA3	Gemeinsamer Unterauftrag 3: Framework Support
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
KOP	Kooperative Manöverabstimmung und -planung
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
UMF	Kooperatives Umfeldmodell

4 KURZDARSTELLUNG

4.1 Aufgabenstellung

4.1.1 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 wurden bereits auf den Markt gebracht. 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 Auf- und Zumachen von Lücken, 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 werden können.

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 in knapper Zeit sichere Entscheidungen zu ermöglichen, 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, ausgebaut und 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 sichere 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.

4.1.2 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 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. Dieses Ziel sollte erreicht werden durch die Erforschung und Definition neuer Nachrichtenformate und Kommunikationsprotokolle für kollektive Perzeption, Intention und kooperative Manöverplanung [1]. Zudem sollte die Einbindung des Fahrers erforscht und MMI-Konzepte für kooperative Funktionen erarbeitet werden. Diese Konzepte sollten sowohl in einer Simulation als auch als Implementierung im Realfahrzeug realisiert werden. Der Nachweis der Validität dieser Konzepte sollte anhand beispielhafter kooperativer Funktionen durchgeführt werden. 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 Fahrassistentenfunktionen 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 fand eine Vernetzung mit nahestehenden Projekten, Plattformen und V2X-Organisationen statt. Diese bestand in einem engen Austausch, zum Beispiel mit den Förderprojekten PEGASUS und Ko-HAF. Nötig waren auch Transferformate wie gemeinsame Workshops für Ergebnisverbreitung im Konsortium und der Ergebnistransfer an die C-ITS-Community. Hierfür diente die 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: Mapping der Einzelziele auf die drei Schwerpunktbereiche

Einzelziele	Schwerpunktbereiche		
	Technologie	Interaktion	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

4.2 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. Kern dieses Programms ist die Suche nach innovativen Lösungsansätzen für Themen des automatisierten Fahrens [2]. 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)
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 	<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
	deren Abbildung (Georeferenzierung) in einer angepassten, digitalen und mehrstufigen Karte	
Schnelle, sichere und zuverlässige Kooperation durch Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung bestehender kooperativer Fahrzeuglösungen unter Berücksichtigung aller informations- und kommunikationstechnischer 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 	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung zur Einbindung des Fahrers bei sich kooperativ verhaltenden und somit zudem komplexeren Systemen

Thema	Ziele des Fachprogramms	IMAGinE-Beiträge
	<ul style="list-style-type: none"> Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzeranforderungen 	
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 des Komforts, der Sicherheit und der Effizienz bzw. des Verkehrsflusses 	<ul style="list-style-type: none"> Demonstration und Validierung der entwickelten Systeme und Fahrversuche und/oder Simulationen Erprobung und Validierung innerhalb eines eigenen TP Neben der Umsetzung in der Simulation wird IMAGinE beispielhafte Funktionen umsetzen und in Realfahrzeugen erproben

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. IMAGinE hatte sich die Erforschung, Entwicklung und Erprobung kooperativer Fahrmanöver zum Ziel gesetzt, die zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit beitragen kann [1].

Im Aktionsplan zur Hightech-Strategie der Bundesregierung wurden innerhalb des beschriebenen Zukunftsprojekts „Nachhaltige Mobilität“^[3, 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 [3].

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 [4].

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, welches 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 KMUs, gelegt. Nachfolgende Abbildung stellt die Partnerstruktur dar.

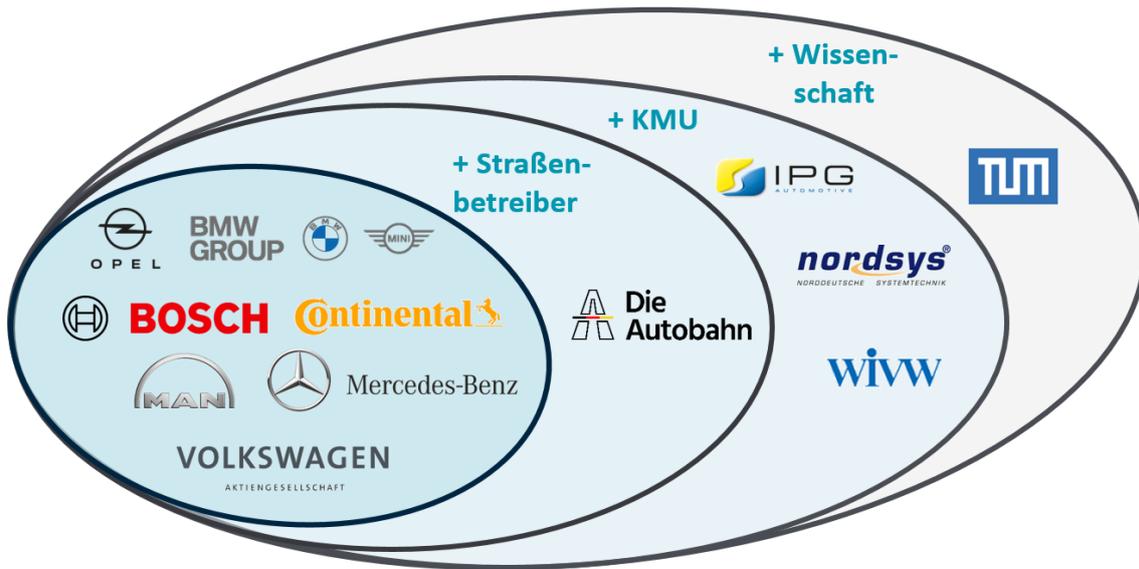


Abbildung 1: Partnerstruktur in IMAGinE

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 KMUs 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 Fahrsimulationssoftware, die die systematische Darstellung und Untersuchung interaktiven bzw. kooperativen Verhaltens unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Diese Software kam in den Häusern mehrerer Konsortialpartner zum Einsatz.

Die IPG Automotive GmbH hat als etablierter Hersteller von Simulationstools 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 in 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.

4.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

4.3.1 Projektstruktur

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



Abbildung 2: Projektstrukturplan

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

TP1: Analyse von Kooperationsszenarien

TP1 befasst sich mit der Analyse der Kooperationsszenarien aus Fahrersicht. TP1 kategorisiert, beschreibt und analysiert die kooperativen Funktionen und IMAGinE-Use Cases mit dem Ziel, harmonisierte Anforderungen herzuleiten. Die Anforderungen an MMI und kooperative Manöver werden aus Fahrersicht beschrieben und den nachfolgenden TPs bereitgestellt.

TP2: Kooperative Funktionen und Systemarchitektur

Zielsetzung von TP2 ist es, basierend auf den von TP1 gelieferten Anforderungen aus Fahrersicht eine technische Spezifikation der Systemarchitektur zu entwickeln. Dazu werden partnerübergreifende Rahmenspezifikationen für kooperative Funktionen erarbeitet. Die Spezifikation von Schnittstellen und die Erstellung einer ersten prototypischen Umsetzung mit Verifikation in der Simulation soll die Interoperabilität der IMAGinE-Funktionen innerhalb eines betrachteten Konzepts zur Manöverabstimmung gewährleisten und dient als gemeinsame Basis der weiteren IMAGinE-Entwicklungsarbeiten. Parallel dazu werden 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, nimmt TP3 die Umsetzung notwendiger Softwaremodule vor. Dies umfasst sowohl die Algorithmen, die im Fahrzeug Anwendung finden, als auch Entwicklungs- und Evaluierungswerkzeuge. Die grundlegenden Module und Protokolle zur hybriden Kommunikation und kollektiven Perzeption werden umgesetzt. Die kooperative Manöverplanung wird entwickelt und getestet, die notwendigen Simulationswerkzeuge und Modelle aufgebaut.

TP4: System- und Fahrintegration

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

TP5: Evaluierung und Erprobung

In TP5 wird 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 wird dabei betrachtet. Außerdem wird in TP5 die gemeinsame Demonstration der Technologien und Funktionen umgesetzt.

TP6: Projektmanagement

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

4.3.2 Projektzeitplan

IMAGinE ist am 01.09.2016 gestartet und endete am 31.05.2022.



Abbildung 3: Projektzeitplan

4.3.3 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.

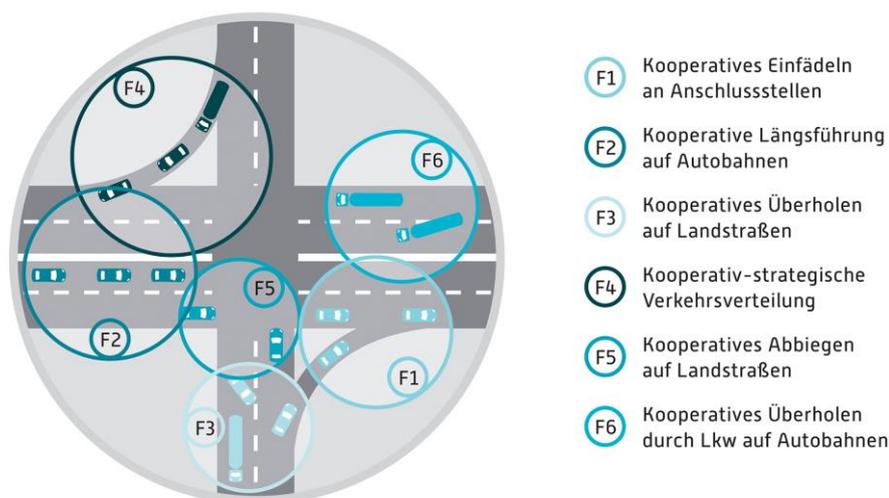


Abbildung 4: Die IMAGinE-Funktionen im Überblick

4.3.4 Meilensteine und Deliverables

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

Der erste Projektmeilenstein (MS1) lag im Projektmonat 10 und beinhaltete 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) lag im Projektmonat 61 und wurde mit dem Abschluss der Fahrzeugintegration 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: Die Evaluation und Demonstration der in IMAGinE entwickelten Funktionalitäten wurde abgeschlossen. Zum MS4 fand zeitgleich 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, die erzielten Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnissen erfolgt in Deliverables. Für jedes AP wurde ein Deliverable definiert.

4.3.5 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 ist 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 Projektpartner	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	AdB	
GUA7	Kartierung Testgelände	AdB	im Projektverlauf entfallen
GUA8	Projektbüro für Projektmanagement	OPEL	
GUA9	Projektbüro für Ergebnisverbreitung	OPEL	

4.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangslage

Die Automation von Fahrzeugen wird seit Jahrzehnten 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 Absprachen 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, im Gegensatz 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 dediziert die "Kooperative Perzeption" untersucht, die hier als Erweiterung der Kommunikation eingestuft wird, da zum Beispiel das Umfeldmodell sowohl durch statische 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 gehen davon aus, dass komplexe Szenarien mit Hilfe der V2X-Kommunikation sicherer und komfortabler gelöst werden können, enthalten aber im Gegensatz zu IMAGinE keine Absprachen zwischen den Kooperationspartnern.

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

4.4.1 Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Es wurden keine Schutzrechte während der Projektlaufzeit angemeldet.

4.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

4.5.1 European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

4.5.1.1 Collective Perception Service

In IMAGinE wurde der Collective Perception (CPS) Service nach einer Vorabdefinition nach ETSI umgesetzt und in einem Gesamtverbund aus bis zu 10 Fahrzeugen umgesetzt. Dies beinhaltet 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, welches die CPM verwendet. Andere Projekte sind u.a.

- 5GNetMobil
- 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 (UU Link) in die Cloud.

4.5.1.2 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.

4.5.2 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

5 EINGEHENDE DARSTELLUNG

IMAGinE schlägt die Brücke von Intelligenter Manöver Assistenz zu Intelligenter Manöver Automatisierung – Kooperative Gefahrenvermeidung **in** Echtzeit. Das zentrale Motto von IMAGinE für Assistenz und Automatisierung ist: „Erst reden, dann handeln.“ Zentrale Herausforderung von IMAGinE ist es, den Sprung vom informativen oder reagierenden Charakter heutiger isoliert agierender Assistenzsysteme hin zu kooperativen Manövern mehrerer Verkehrsteilnehmer darzustellen. Des Weiteren soll 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, stellt einen entscheidenden Schritt dar auf dem Weg zum unfallfreien und zum automatisierten Fahren.

Unsere Zielsetzung war dabei, einerseits die Technologie für das Vernetzte und Kooperative Fahren voran zu bringen, und um andererseits unsere ACC-Funktion, die DISTRONIC, weiter zu entwickeln, um Längsunfälle und Unfälle mit dem Querverkehr zu entschärfen, bzw. zu vermeiden.

Im Verbundprojekt IMAGinE hat Mercedes-Benz die Funktionen „Kooperative Abstandsregelung zu vorausfahrenden Fahrzeugen“ (F2) und „Kooperatives Ein- und Ausfädeln an Auffahrten und Verflechtungsbereichen“ (F1) bearbeiten und umgesetzt. Neben den Funktionen liegt der Schwerpunkt der Aktivitäten von Mercedes-Benz in der kooperativen Perzeption (Leitung AP 1.3 und 3.1) und in Kollaborationsprotokollen zur Abbildung generischer Kooperation. Im Speziellen wurde hier die Absicherung der Kooperation unter widrigen Netzwerkbedingungen (sog. „Byzantinische Netzwerke“) untersucht und umgesetzt.

5.1 TP1: Analyse von Kooperationszenarien

Mercedes-Benz hat sich im Teilprojekt 1 aktiv die Ausarbeitung sowie der Definition der Use Cases für die Funktionen F2 (Längsführung) und F1 (Einfädeln) bearbeitet. Nachfolgend werden die Use-Cases und Ergebnisse aus den Arbeiten vorgestellt.

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

Ausarbeitung der Funktionsabläufe zur Ableitung von Use Cases mit Hinblick auf Fahrer-Interaktion und Systemabläufe. Erarbeitung des Koordinationsablaufes für die identifizierten Use Cases zur Vorbereitung der Arbeiten in nachfolgenden TP 2 und TP 3.

Harmonisierung der Anforderungen, insbesondere in Bezug auf Funktionen F2 (Längsführung) und F1 (Einfädeln).

Zielsetzung und Motivation

Menschen kommunizieren beim Autofahrer meist nonverbal. Unser Ziel war: diese Eigenschaft technischen Systemen beizubringen.

Dabei setzten wir auch wie alle IMAGinE Partner auf

- car2x als zusätzlichen Sensor zur der bordautonomen Sensorik
- dem kooperativen Umfeldmodell
- und insbesondere auf das rollenbasierte Manöverabstimmungskonzept

In IMAGinE wurden 6 kooperative Funktionen adressiert. Wir haben uns auf die Funktionen F1 Merging (unter unserer Federführung) und F2 Platooning (unter der Federführung vom DCAITI) konzentriert.

Ein Grund hierfür zeigt ein Blick in die Unfallstatistik auf Autobahnen (Abbildung 6).

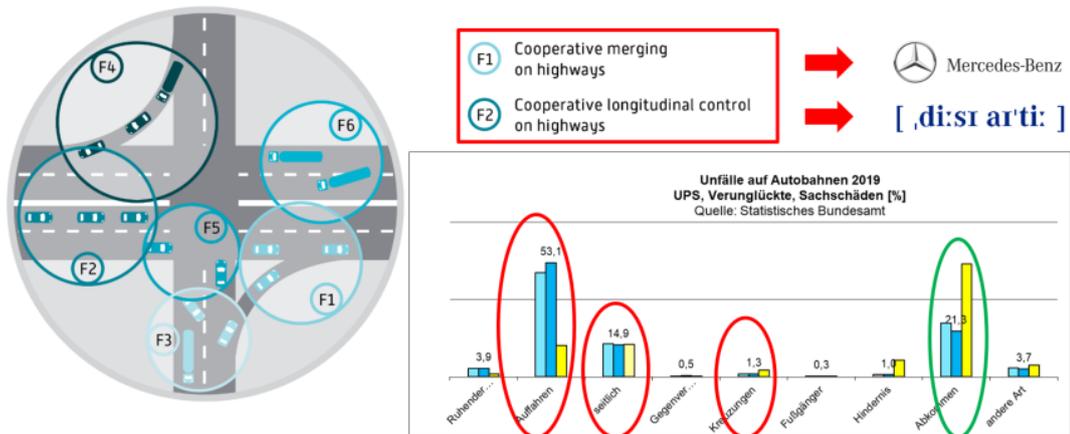


Abbildung 6 Unfallstatistik auf deutschen Autobahnen

Spurhaltesysteme adressieren das Abkommen von der Fahrbahn und sind in verschiedenen Ausprägungen bereits heute schon im Markt

Seitliche Unfälle wurden bisher nur wenig betrachtet und ebenso wie Auffahrunfälle, die von heutigen Notbremssysteme oftmals nicht vermieden werden können. Die Funktionen F1 und F2 bieten somit großes Potential zur Erhöhung der Sicherheit auf Autobahnen.

Beim Einfädeln müssen alle beteiligten Verkehrsnehmer Abbremsen oder einen Spurwechsel unter räumlichen und zeitlichen Einschränkungen durchführen.

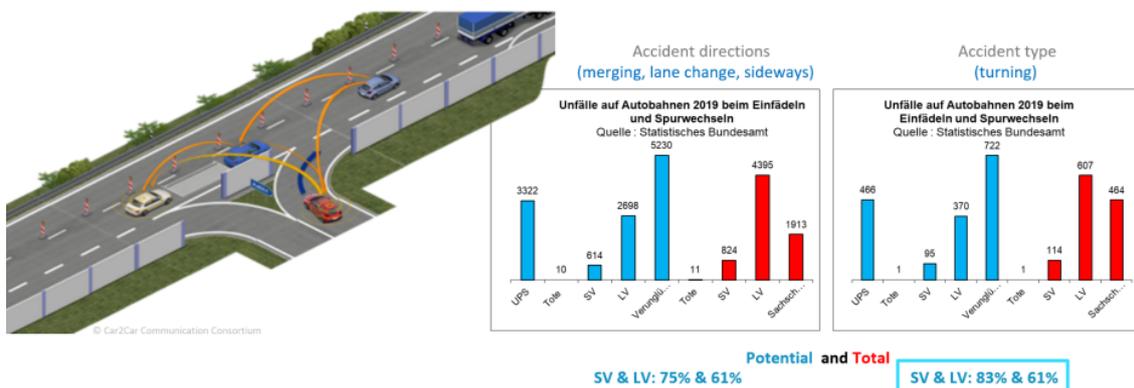


Abbildung 7: Unfallvermeidungspotentiale der Funktion F1 (© Car2Car Communication Consortium)

Fasst man die Unfalltypen aller seitlichen Kollisionen zusammen (also die Konfliktsituationen), so besteht das Vermeidungspotential bei den SV 83% und bei den LV sogar 61% (Abbildung 7).

Durch das abrupte Abbremsen eines Fahrzeugs kann ein Phantomstau entstehen. Um einen solchen Stau zu verhindern wäre die Lösung geringere aber dafür immer gleiche Abstände zwischen den Fahrzeugen einzuhalten, was die Funktion F2 ermöglichen soll

Allerdings können das heutige ACC Systeme nicht erfüllen, da ihre Wirkung von den heutigen Sensoreigenschaften (Reichweiten, Erkennungs/Klassifikationsraten und Latenzen) beschränkt ist. Bei der Mercedes-Benz AG sind wir sehr an zukunftsweisenden Technologien interessiert und wollen deren Weiterentwicklung aktiv vorantreiben. Beispielsweise mit dem herstellerübergreifenden Projekt IMAGinE, das u.a. darauf abzielt, das Einfädeln sowie die Abstandshaltung im Rahmen des Autobahnverkehrs zu optimieren. Die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse sind äußerst wertvoll und können uns dabei helfen, die heute bereits serienmäßig verfügbaren ACC Systeme für die Abstandshaltung weiterzuentwickeln.

Zusätzlich weist die Funktion F2 (kooperative Abstandshaltung) zur Vermeidung von Unfällen im Längsverkehr (Unfallart), ein Unfallvermeidungspotential bei den Auffahrunfällen und beträgt bei den SV 70%, bei den LV 54%. Gerade die Weiterentwicklung unseres ACC-Systems, also der Distronic, war auch eines unserer wichtigen Ziele (Abbildung 8)

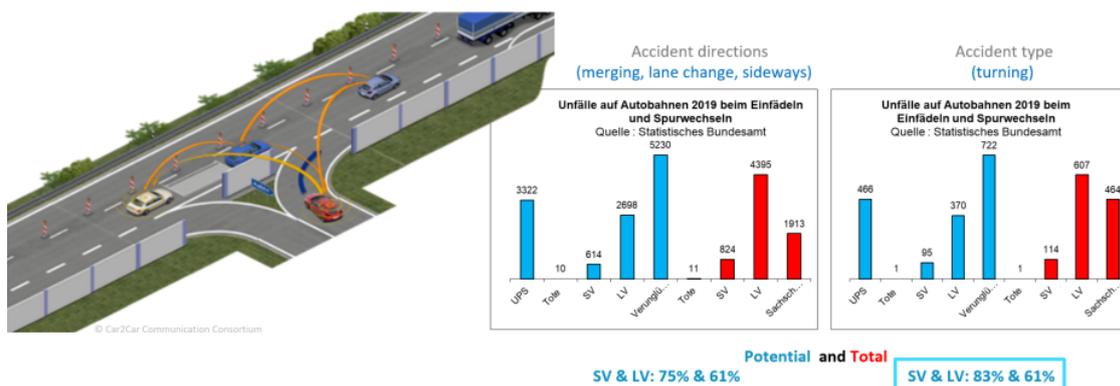


Abbildung 8: Unfallvermeidungspotentiale der Funktion F2 (© Car2Car Communication Consortium)

Für die Verbesserung unseres heutigen ACC Systems, der Distronic, bei der Abstandshaltung, kommt aber auch eine situative Modifikation der verbesserten Abstandshaltung eine wichtige Bedeutung zu. Das lässt sich durch die Kombination der Funktionen F1 und F2 zu F12 erreichen.

5.2 TP2: Kooperative Funktionen und Systemarchitektur

Für die simulativen Untersuchungen hinsichtlich der Funktionen F1 und F2 musste eine Simulationsumgebung zum Einsatz kommen, die folgende Anforderungen in sich vereinigt. F1 und F2 greifen in die Fahrphysik ein. Daher muss in der Simulation die Fahrphysik hinreichend realistisch abgebildet werden, um eine aus Sicht der Funktion realistische Regelschleife zwischen Sensorik, Aktorik und Fahrfunktion abbilden zu können. Um den kooperativen Aspekt der Funktionen abbilden zu können, muss die Simulationsumgebung außerdem eine hinreichend realistische Kommunikationssimulation mit sich bringen. Eine hinreichend realistische Verkehrssimulation muss zusätzlich aus Sicht der Funktionen den Umgebungsverkehr abbilden können, welcher sich natürlicher Weise beim Einsatz im realen Fahrzeug im realen Straßenverkehr wiederfinden würde. Schließlich müssen alle genannten Aspekte in der Simulationsumgebung skaliert werden, d.h. auf eine größere Anzahl Fahrzeuge ausgeweitet werden können, entweder als kooperierende Teilnehmer oder unbeteiligter Umgebungsverkehr.

Diese Anforderungen vereint die eingesetzte Simulationsumgebung Eclipse MOSAIC [5]. Die Laufzeitinfrastruktur von Eclipse MOSAIC koppelt verschiedene Simulatoren. Jeder Simulator, der durch MOSAIC gekoppelt ist, deckt eine bestimmte Domäne ab, welche den o.g. Anforderungen Rechnung tragen: Fahrphysik (PHABMACS), Verkehr (SUMO), Kommunikation (OMNET [6]). Die MOSAIC Runtime Infrastructure (RTI) verbindet diese Simulatoren zur Laufzeit und ermöglicht ihnen eine rückgekoppelte Interaktion untereinander.

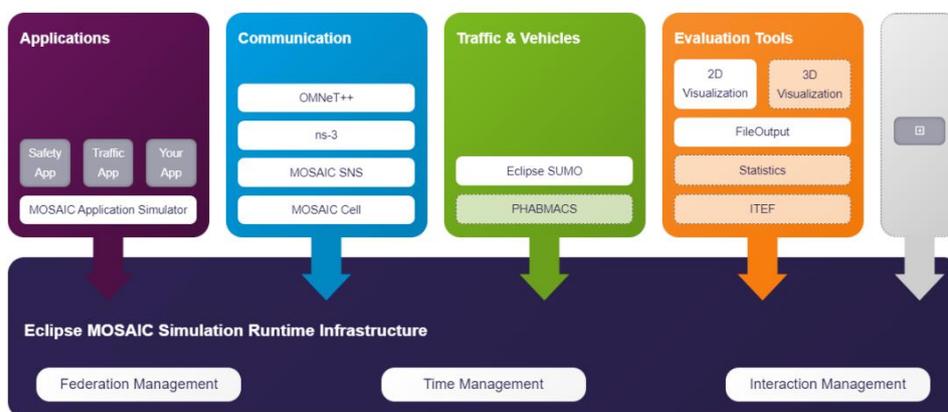


Abbildung 9: MOSAIC Runtime Infrastructure (RTI)

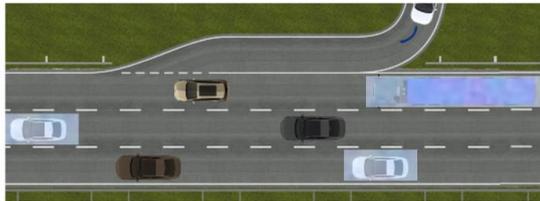
Funktion F1

Für die Funktion F1 wurden umfangreich Simulationsstudien durchgeführt. Hierbei wurde unterschieden in:

- rein simulierten Szenarien im freien, im dichteren und im sehr dichten Verkehr (Stau)
- die Integration von realen Verkehrsdatensätzen (zum Testen der Algorithmen ohne Kommunikation und Manöverabstimmung)
- sowie die Modifikation der Realdatensätze für die Interaktion zwischen den Fahrzeugen (zum Testen der Algorithmen mit Kommunikation und Manöverabstimmung)

Nachfolgende Abbildung zeigt das kooperative Einfädeln mit kooperativem Umfeldmodell.

Ego-Sensorsicht



Erweitertes Umfeldmodell



Abbildung 10: Kooperative Einfädeln mit kooperativem Umfeldmodell und Prädiktion

Reine Simulation

Mercedes-Benz verwendet als Laufzeitumgebung für Funktionen F1 und F2 in Simulation im Projekt IMAGinE den im Fraunhofer-Institut FOKUS sowie dem DCAITI entwickelten Simulator PHABMACS. PHABMACS ist ein Simulator, der die Fahrphysik und Sensorik für mehrere hundert Fahrzeuge realistisch abbilden kann und zur Entwicklung von kooperativen Assistenzsystemen genutzt wird.

Jedes Fahrzeug ist dabei ein eigenständiges Fahrzeug, das mit verschiedenen Reglern und Assistenzsystemen ausgestattet werden kann. Als Teil des Eclipse MOSAIC Projekts (<https://projects.eclipse.org/proposals/eclipse-mosaic>) kann PHABMACS mit etablierten Netzwerksimulatoren (z.B. mit OMNeT++ oder ns-3) gekoppelt, hinsichtlich der Kommunikationstechnik untersucht werden. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Interaktion zwischen dem PHABMACS Powertrainmodell, der simulierten Fahrzeugumgebung und dem Fahrermodell bzw. der zu untersuchenden Fahrfunktion.

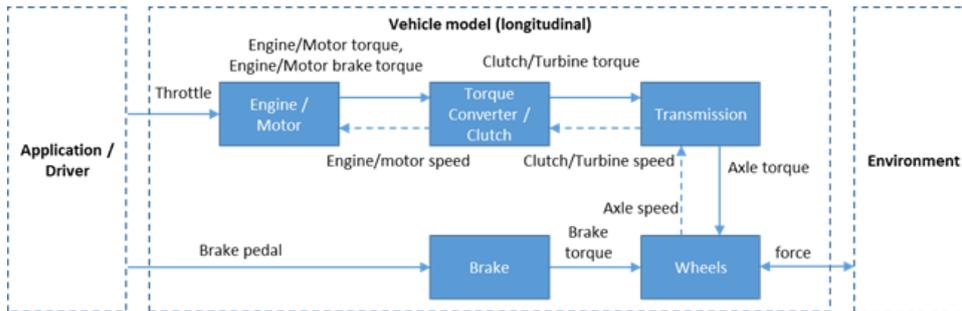


Abbildung 11: PHABMACS Powertrainmodell

Nachfolgende Abbildung zeigt die Simulationsumgebung PHABMACS mit einer rein Simulierten Einfädelsituation. Anhand dieses Szenarios konnten die Algorithmen getestet und verbessert werden.

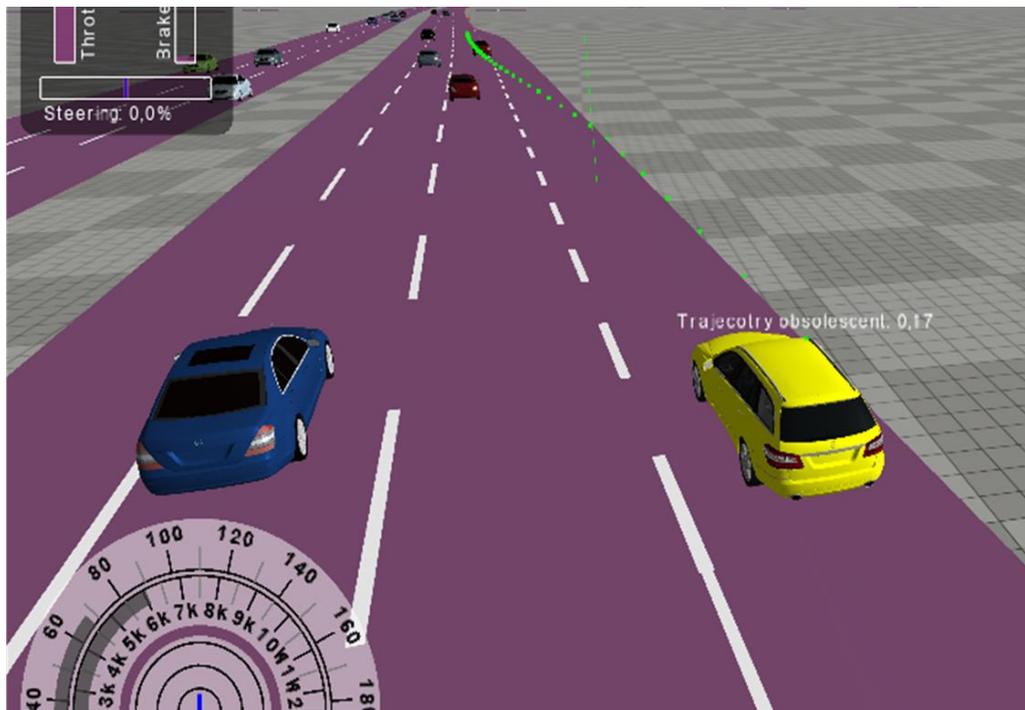


Abbildung 12: Simuliertes Einfädelszenario aus Sicht des Einfädlers

5.2.1 Reale Verkehrsdatensätze

Der Hintergrund für die Integration von Realverkehrsdatensätzen war die Fragestellung: „Wie verhält sich ein autonomes Fahrzeug in einem unkooperativen Umfeld?“ Zu Beginn des IMAGinE Projektes haben wir uns überlegt, wie wir unsere kooperativen Funktionen und Algorithmen in der Simulation möglichst so realitätsnah wie möglich testen können.

Problem bei der Erstellung von Test-Szenarien in der Simulation ist, dass eine sehr gute realitätsgetraue Abbildung von Verkehr benötigt wird. Hierfür gibt es Modelle, welche natürlich gewissen Unschärfen unterliegen.

Gerade beim Einfädeln oder im Umfeld eines Einfädelbereichs ist das Verhalten der Verkehrsteilnehmer sehr abhängig vom menschlichen Verhalten und situativ bedingter Reaktionen.

Um die Algorithmen in einem möglichst realen Umfeld testen zu können, haben wir den HighD Datensatz der RWTH Aachen in unsere PHABMACS Simulation eingebunden.



Abbildung 13: Realdatensatz der RWTH Aachen. Quelle: HighD dataset (www.highd-dataset.com)

In einem zweiten Schritt wurde auch der exID-Datensatz an die Simulationsumgebung angebunden. Dieser beinhaltet wesentlich mehr Ein- und Ausfädelmanöver.

Integration von Zu Beginn des Simulationsdurchlaufs werden die zuvor aufgenommenen Reale-Fahrzeug-Situationen aus dem Real-Datensatz geladen.

Hiermit wird ein Simulationsszenario erstellt, welches die realen Daten „abspielt“.

Realdatensatz HighD

Zu Beginn des Simulationsdurchlaufs werden die zuvor aufgenommenen Reale-Fahrzeug-Situationen aus dem Real-Datensatz geladen.

Hiermit wird ein Simulationsszenario erstellt, welches die realen Daten „abspielt“.

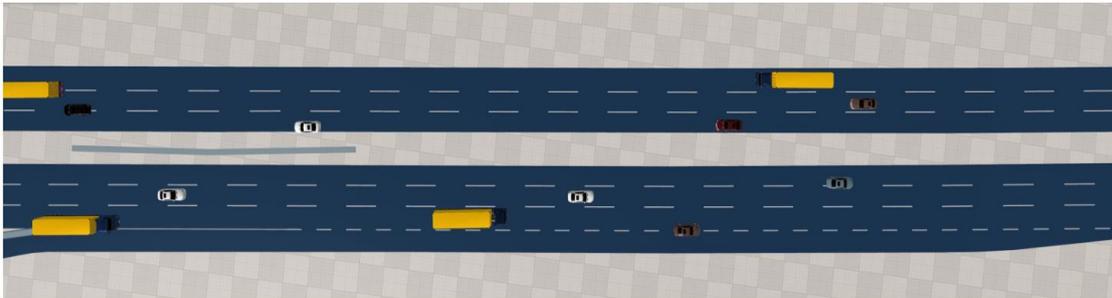


Abbildung 14: Visualisierung des Realdatensatz HighD In PHABMACS

Nach Projektende wurde ferner der ExiD-Datensatz der RWTH Aachen eingebunden. Mit diesem Datensatz können weitere Untersuchungen hinsichtlich Robustheit und Funktionalität der Algorithmen durchgeführt werden.

5.2.2 Realisierung von Interaktionen von Fahrzeugen

Die Problematik beim Abspielen von Realdatensätzen in der Simulation ist, dass das Einfügen von Fahrzeugen die Situation verändert. Ein reines Abspielen der Daten ist, zumindest im nahen Umfeld des eingefügten Fahrzeugs (Aktionsradius) keine realverkehrs-abbildende Situation.

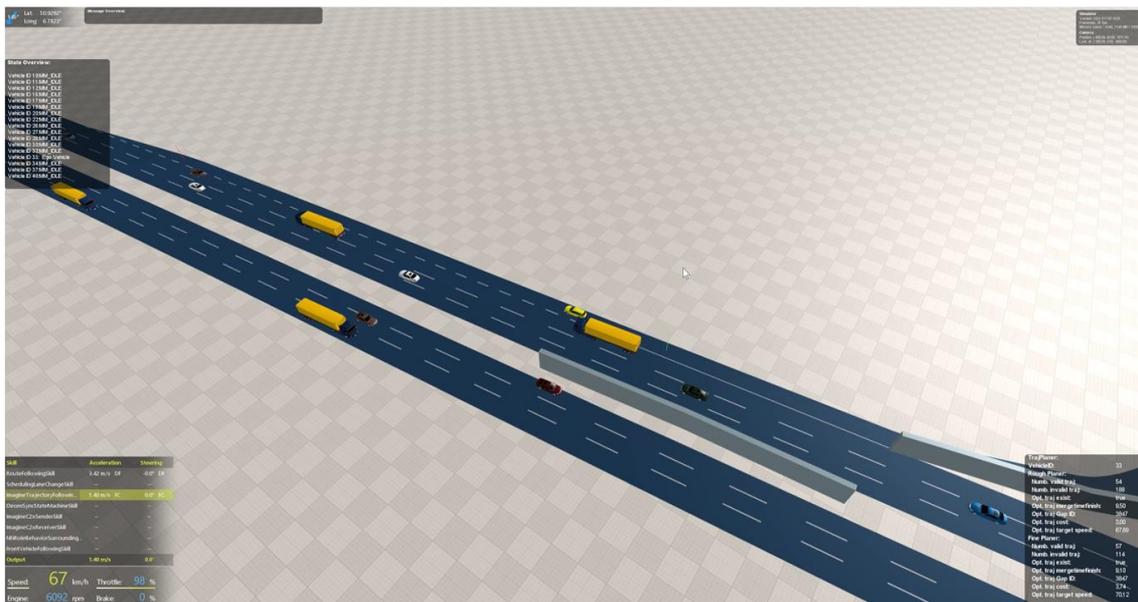


Abbildung 15: Einfädeln ohne Verhaltensanpassung

Beim Einfädeln wird dieses Fahrzeug in das reale Simulationsszenario eingefügt, welches z.B. startend von der Einfädelspur auf die Hauptfahrbahn wechseln will. Verändert dieses das geplante Manöver bzgl. der Position und des Verhaltens dieses Fahrzeugs, bedingt durch die Reaktion der umliegenden Verkehrsteilnehmer.

Die umliegenden Verkehrsteilnehmer oder auch mögliche Kooperationspartner aus dem realen Datensatz (Vorder- und Hinterfahrzeug) müssen sich nun adäquat zur neuen Situation verhalten, d.h. hier rollenadäquates Verhalten.

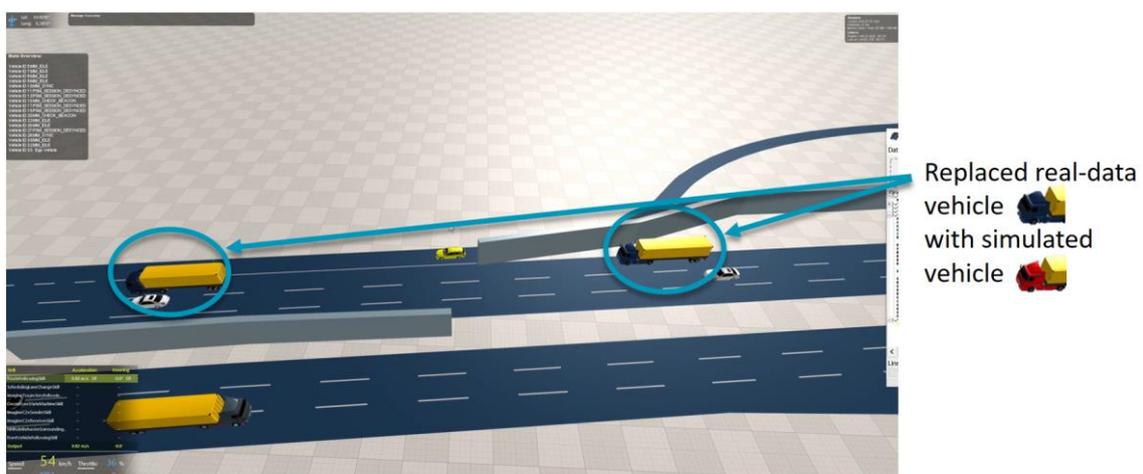


Abbildung 16: Einfädeln mit Verhaltensanpassung reale Fahrzeuge

Dieses wird durch einen gezielten Austausch von realen Fahrzeugen mit simulierten Fahrzeugen im Aktionsfeld realisiert.

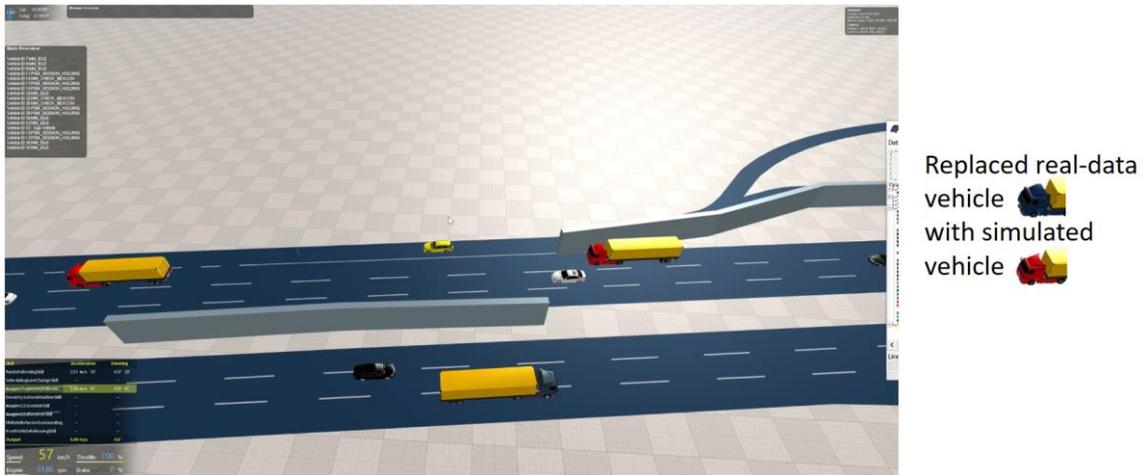


Abbildung 17: Einfädeln mit Verhaltensanpassung simulierte Fahrzeuge

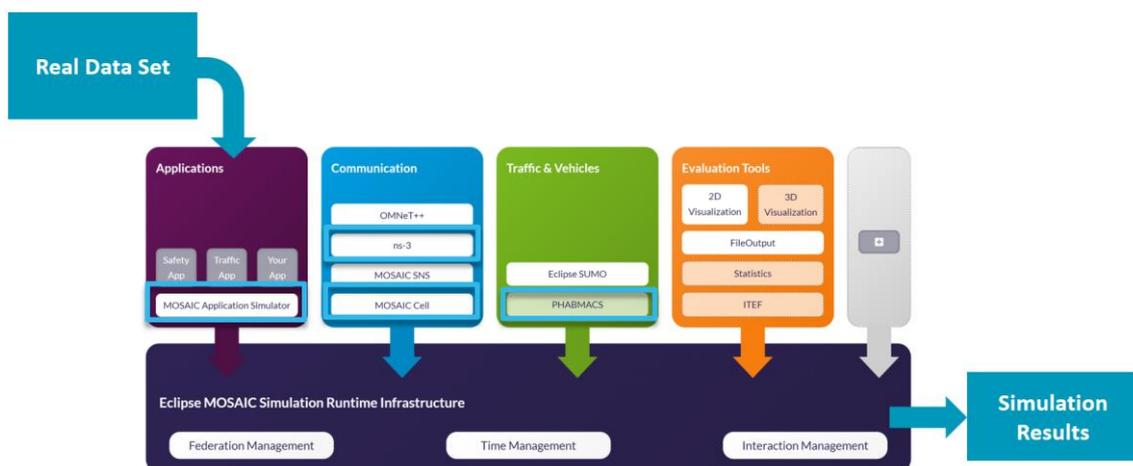


Abbildung 18: Setup unserer verwendeten Simulationsumgebung

Um kooperative Funktionen und Algorithmen realitätsnah testen zu können, haben wir Realdatensätze eingebunden, da eine sehr gute realitätsgetraue Abbildung von Verkehr benötigt wird.

Zu Beginn eines Simulationsdurchlaufs werden die zuvor aufgenommenen Reale-Fahrzeug-Situationen aus dem Real-Datensatz geladen. Damit wird ein Simulationsszenario erstellt, welches die realen Daten nur „abspielt“.

In dieses Setup könnten nun simulierte Fahrzeuge eingefügt werden, um bspw. die kooperativen Funktionen zu testen.

Die Problematik hierbei ist, dass das Einfügen von Fahrzeugen die Situation verändert. Aber ein reines Abspielen der Daten ist, zumindest im nahen Umfeld des eingefügten Fahrzeugs – wir sprechen vom Aktionsradius – keine realverkehr abbildende Situation.

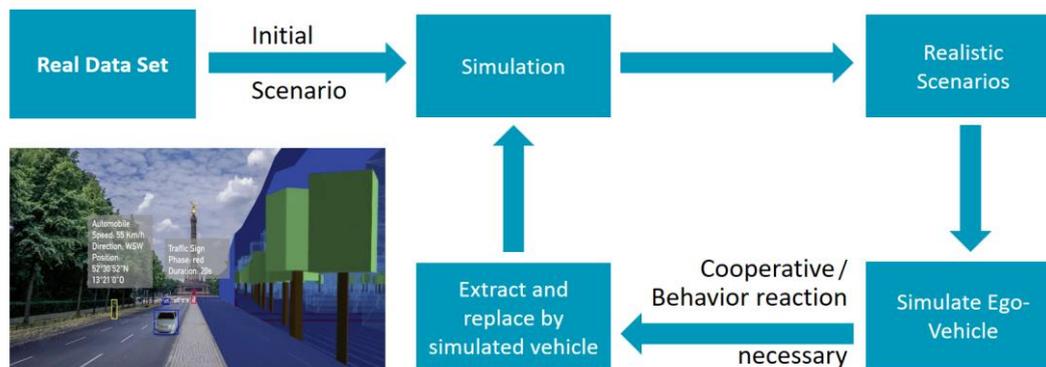


Abbildung 19: Modifikation der Simulationsumgebung

Mit diesem Simulationsaufbau wurden im Scenario F1 kooperatives Einfädeln folgende Szenarien untersucht.

- Einfädeln in simulierten unkooperativen Verkehr
- Einfädeln in kooperativem simulierten Verkehr
- Einfädeln in real-daten basiertem Verkehr
- Einfädeln in hybriden Verkehr, bestehend aus real-daten und simulierten Verkehr.

Ferner wurden folgende Untersuchungen für Scenario F2 durchgeführt:

- den Aufbau, oder die Initiierung
- das Fahren in einem Platoon
- die Auslösung oder Teilung des Platoons

Die Funktion 2 stellt die kooperative Längsführung von Fahrzeugen auf Autobahnen dar. Die simulative Verifikation der Funktion 2 setzt sich aus der Verifikation des kooperatives ACCs (cACC) und der Verifikation des Platoonings in Simulation zusammen. Als Strecke für die Simulationsszenarien soll eine Autobahnstecke mit mindestens zwei Fahrspuren und ggf. ein Standstreifen in jeder Richtung dienen. Zusätzlich soll je nach Szenario noch eine Autobahnabfahrt, eine Kurve, Verkehrszeichen und Verkehrsbeeinflussungsanlagen mit implementiert werden. Für das cACC sollen fünf Szenarien untersucht werden, welche im

Projekt durch den Partner MAN abgedeckt wurden, während die Mercedes-Benz AG die Verifikation des Platooning anhand der folgenden PKW-bezogenen Szenarien übernommen hat.



Abbildung 20: Platooning Szenario 1-3 (© Car2Car Communication Consortium)

Im ersten Szenario soll das Bilden eines Platoons untersucht werden. Auf der rechten Spur fahren drei Fahrzeuge mit derselben Gesamtmasse und Geschwindigkeit von ca. 80 km/h. Alle drei Fahrzeuge können mit V2X kommunizieren. Fahrzeug 1 sendet eine Anfrage für Platooning. Im ersten Fall möchten Fahrzeug 2 und 3 ein Platoon mit Fahrzeug 1 bilden. Es soll ein Platoon gebildet werden. Im zweiten Fall will nur Fahrzeug 3 ein Platoon bilden. Fahrzeug 2 müsste entweder mit Fahrzeug 3 Platz tauschen (Funktion F6 für Lkw) oder es kann kein Platoon gebildet werden. Im dritten Fall will weder Fahrzeug 2 noch Fahrzeug 3 ein Platoon bilden. Es soll kein Platoon gebildet werden. Im vierten Fall senden Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2 eine Platooninganfrage. Es soll im ersten Schritt zu einem Platooning zwischen Fahrzeug 2 und 3 kommen. Fahrzeug 1 kann später dem Platoon beitreten (später beschriebenes Szenario). Im fünften Fall sendet, gegenüber den anderen Fällen, Fahrzeug 1 keine Platooninganfrage, sondern nur Fahrzeug 2. Fahrzeug 2 und 3 sollen ein Platoon bilden, Fahrzeug 1 soll erkennen, dass das Platooning erstmal nicht für ihn relevant ist.

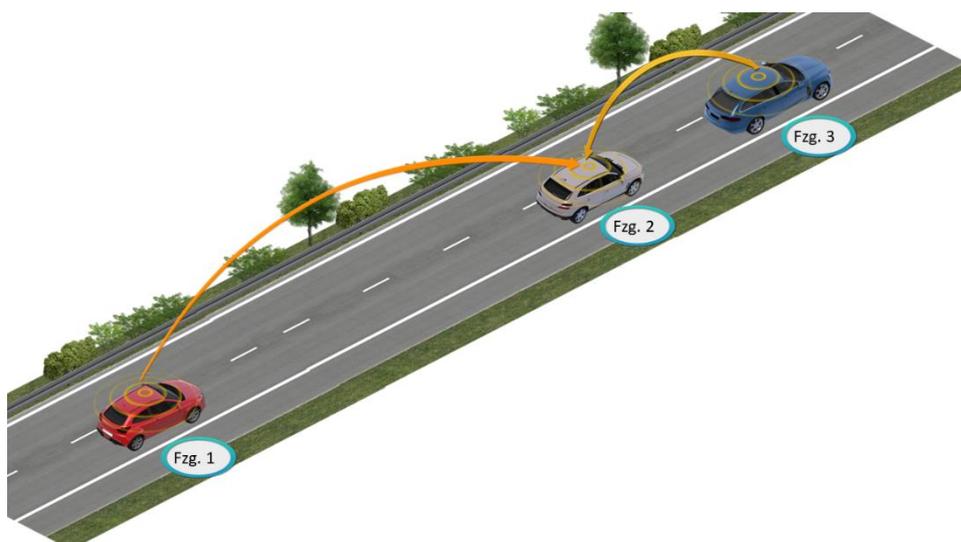


Abbildung 21: Platooning Szenario 1 (© Car2Car Communication Consortium)

Im zweiten Szenario fahren Fahrzeug 1 und 2 auf der rechten Spur im Platoon. Fahrzeug 3 fährt hinter dem Platoon, Fahrzeug 4 vor dem Platoon und Fahrzeug 5 auf der linken Spur neben dem Platoon. Alle Fahrzeuge können mit V2X kommunizieren, fahren in der Ausgangsposition mit 80 km/h und haben ungefähr dieselbe Gesamtmasse. Im ersten Fall tritt Fahrzeug 3 dem Platoon bei, durch Anschließen am Ende. Im zweiten Fall tritt Fahrzeug 4 dem Platoon von vorne bei. Im dritten Fall tritt Fahrzeug 5 dem Platoon zwischen Fahrzeug 1 und 2 bei.

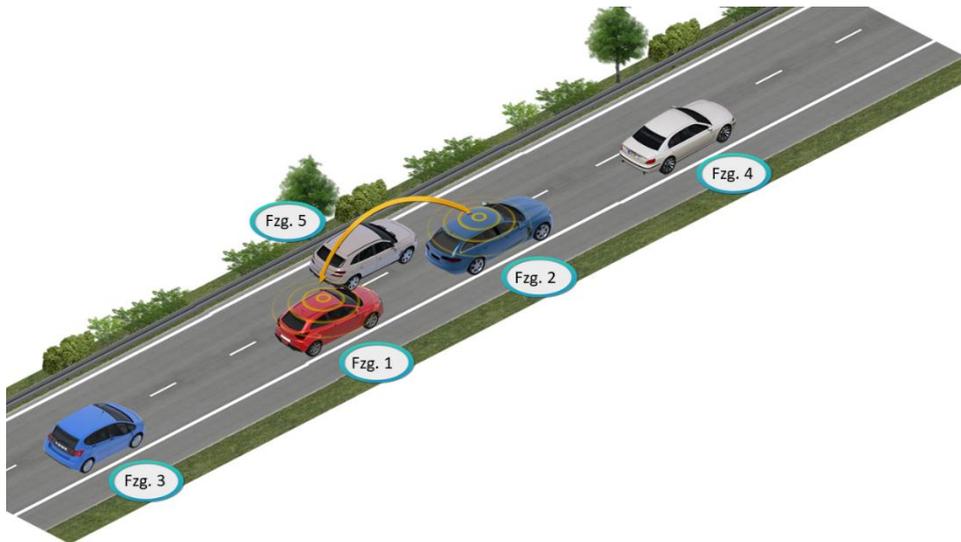


Abbildung 22: Platooning Szenario 2 (© Car2Car Communication Consortium)

Im dritten Szenario fahren drei Fahrzeuge im Platoon auf der rechten Spur mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h. Fahrzeug 1, 2 und 3 haben ungefähr dieselbe Gesamtmasse. Im ersten Fall verlässt Fahrzeug 1, im zweiten Fahrzeug 2 und im dritten Fall Fahrzeug 3 das Platoon. Im vierten Fall verlässt Fahrzeug 3 das Platoon durch Abfahren an der Autobahnausfahrt.

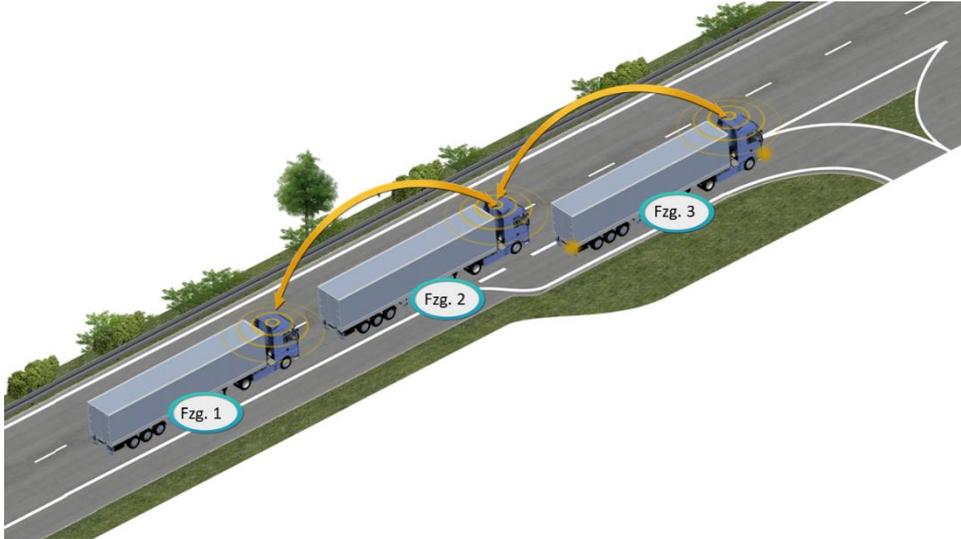


Abbildung 23: Platooning Szenario 3 (© Car2Car Communication Consortium)

5.2.3 Kombination von Funktion F1 und F2

Bei der Kombination der beiden kooperativen Funktionen geht es um das Einfädeln in eine Fahrzeugkolonne oder in ein Platoon. Wir haben bewusst keine V2X Informationen dabei benutzt, sondern haben uns die bestehenden Möglichkeiten näher betrachtet:

- unkooperative Verkehrsteilnehmer, hier ist ein Einfädeln nur vor oder nach der Fahrzeugkolonne/Platoon möglich
- kooperative Verkehrsteilnehmer, hier können die einzelnen Fahrzeuge eine Lücke aufmachen, die entsprechend der Lückenauswahl, zunächst priorisiert und die nachfolgend angefragt wird.

5.3 TP3: Kooperative Technologien

Bei einer Betrachtung auf der System-of-Systems-Ebene besteht die IMAGinE-Architektur aus zwei unterschiedlichen Systemen, d.h. das IMAGinE-Framework sowie ein partnerspezifisches System, das von Mercedes-Benz sowie jedem anderen Partner individuell entwickelt wurde. Die Kommunikation zwischen diesen beiden Systemen erfolgt über das Framework-2-Framework-Gateway (FGW). Das kooperative Umfeldmodell ist eine Kern-Komponente im IMAGinE-Framework. Im AP3.1 hat das DCAITI für Mercedes-Benz als AP-Leiter die Architektur für das kooperative Umfeldmodell mitentwickelt.

Für das kooperative Umfeldmodell im IMAGinE-Framework wurden drei verschiedene Ausbaustufen entworfen, wodurch sich jeweils eine unterschiedliche Architektur ergibt. In der ersten Ausbaustufe übernimmt das partnerspezifische System die lokale Sensorfusion und liefert bereits Objektlisten an das IMAGinE-Umgebungsmodell. Dabei findet die Fusion im partnerspezifischen System statt, so dass bereits Objekte aus verschiedenen fahrzeugspezifischen Sensoren fusioniert sind.

In der zweiten Ausbaustufe übernimmt das IMAGinE Umfeldmodell die Fusion von Objekten mehrerer Sensoren. Das partnerspezifische System muss jedoch ebenfalls Sensorfusion durchführen und das Ergebnis der Assoziation von Objekten von mehreren Sensoren zum IMAGinE-Umgebungsmodell liefern. Diese Informationen unterstützen dann die Fusion.

In der dritten Ausbaustufe werden nur die Sensor-Objektlisten, also alle von einem Sensor erfassten Objekte, an das Umfeldmodell von IMAGinE übertragen. Es gibt dann keine Assoziation zwischen Objekten von verschiedenen Sensoren vor der Verarbeitung im Umgebungsmodell. Im Umfeldmodell werden verschiedene Objekte in der Umgebung aus sensorbasierten Daten und V2X-Daten fusioniert, getrackt und den anderen Modulen des IMAGinE-Frameworks zur Verfügung gestellt. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Gesamtarchitektur.

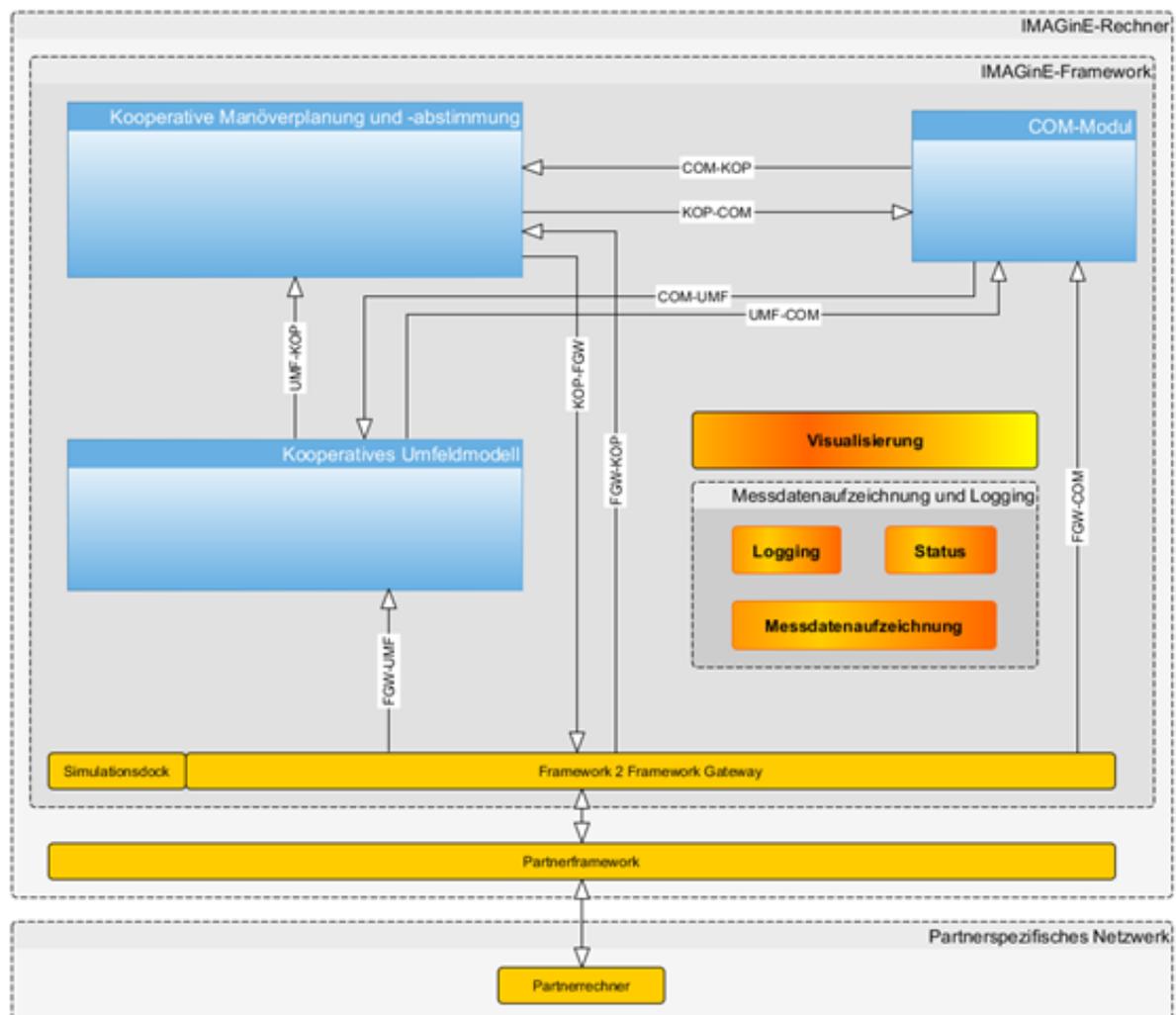


Abbildung 24: IMAGinE-Umfeldmodellist

Das IMAGinE-Umfeldmodell ist die zentrale Datenbasis, auf der die kooperativen Funktionen Entscheidungen treffen und sich koordinieren. Das Umgebungsmodell umfasst sowohl lokale Quellen als auch über V2X ausgetauschte Informationen aus der kollektiven Perzeption. Die lokalen Quellen werden wiederum unterteilt in Informationen aus partnerspezifischen Komponenten und IMAGinE-spezifischen Elementen wie Kartendaten.

Die Daten aus der partnerspezifischen Perzeption werden verwendet, um die Nachrichten für die kollektive Perzeption zu senden. Die Funktionalität des IMAGinE-Rechners wird durch die drei Module "Umfeldmodell" (UMF), "Kooperative Manöverplanung und -abstimmung" (KOP) und das Kommunikationsmodul (COM) realisiert. Das UMF-Modul stellt über die Schnittstellen UMF-KOP.1 und UMF-KOP.2 die Informationsbasis für das KOP-Modul bereit.

Dazu nutzt es unter anderem Informationen von CPM und CAM, die es von anderen Fahrzeugen über das COM erhält und mit denen es über die Schnittstellen UMF-COM und COM-UMF

kommuniziert. Außerdem erhält er über die FGW-UMF-Schnittstelle Nachrichten vom partnerspezifischen System. Das Umfeldmodell ist in mehrere Komponenten unterteilt.

Eingangskomponenten

Datenbank

Diese Komponente ist das zentrale Element des Umgebungsmodells. Es enthält die aktuelle globale Objektliste und aggregiert Onboard-Messungen und über V2X empfangene Messungen (über V2X empfangene Nachrichten und Objekte werden im Umgebungsmodell auch als Messungen bezeichnet), lokale Objektlisten und Fahrzeugzustandsinformationen. Diese Messungen werden plausibilisiert und zur Aktualisierung der Tracks, also der letzten in Ringpuffern gespeicherten Positionen eines Objekts, verwendet.

Data Base Management

Diese Komponente ist für die Aktualisierung der Ringspeicher für Onboard- und V2X-Messungen, lokale Objektlisten und Fahrzeugzustandsinformationen verantwortlich. Ebenso werden Tracks erstellt, wenn Messdaten keinem vorhandenen Track zugeordnet werden können, und Tracks werden gelöscht, wenn sie für eine bestimmte Zeit keine aktualisierten Messdaten erhalten haben.

Kartenserver

Diese Komponente extrahiert zur aktuellen Position passende Kartenausschnitte aus einer im IMAGinE-System oder im teilespezifischen System hinterlegten Karte, konvertiert sie in das IMAGinE-Kartenformat und kommuniziert sie an die anderen Module.

Dynamische Datenassoziiierung:

Diese Komponente empfängt dynamische Nachrichten über V2X (Schnittstelle COM-UMF.2), z. Verkehrsdichte und verwendet die Karten-API, um diese Informationen mit der IMAGinE-Karte zu verknüpfen. Anschließend werden alle empfangenen Daten zu einer Liste zusammengefasst und über die UMF-KOP.1-Schnittstelle der KOP-Komponente 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 wertet die in der globalen Objektliste gehaltenen dynamischen Objekte aus. Diese Informationen werden verwendet, um zu entscheiden, welche Informationen über V2X geteilt werden.

Map Matching

Diese Komponente ist für das Auffinden von Objekten aus der globalen Objektliste in dem vom Kartenserver bereitgestellten Kartenausschnitt zuständig.

Ausgabekomponenten

Object List Extraction

Diese Komponente ist für die Extraktion von Informationen verantwortlich, die über die UMF-KOP.2-Schnittstelle an das KOP-Modul gesendet werden.

Collective Perception Extraction

Diese Komponente ist für die Bereitstellung von über V2X geteilten Informationen in Form von CPM verantwortlich. Dies schließt ausdrücklich nur Sensor-Objekte ein, über V2X empfangene Objekte („Multi-Hop“) wurden nicht geteilt, um Filter-Kaskaden zu verhindern.

MAP API Library

Dies ist keine Komponente in dem Sinne, dass es definierte Ein- und Ausgabeschnittstellen gibt, sondern eine Bibliothek, die verschiedene Funktionen bereitstellt, um die IMAGinE-Map effizient in den Modulen nutzen zu können. Beispielsweise ermöglicht UMF-KOP.1 dem KOP-Modul, Positionen mit der IMAGinE-Karte abzugleichen, indem die Map Matching-Funktion der API verwendet wird.

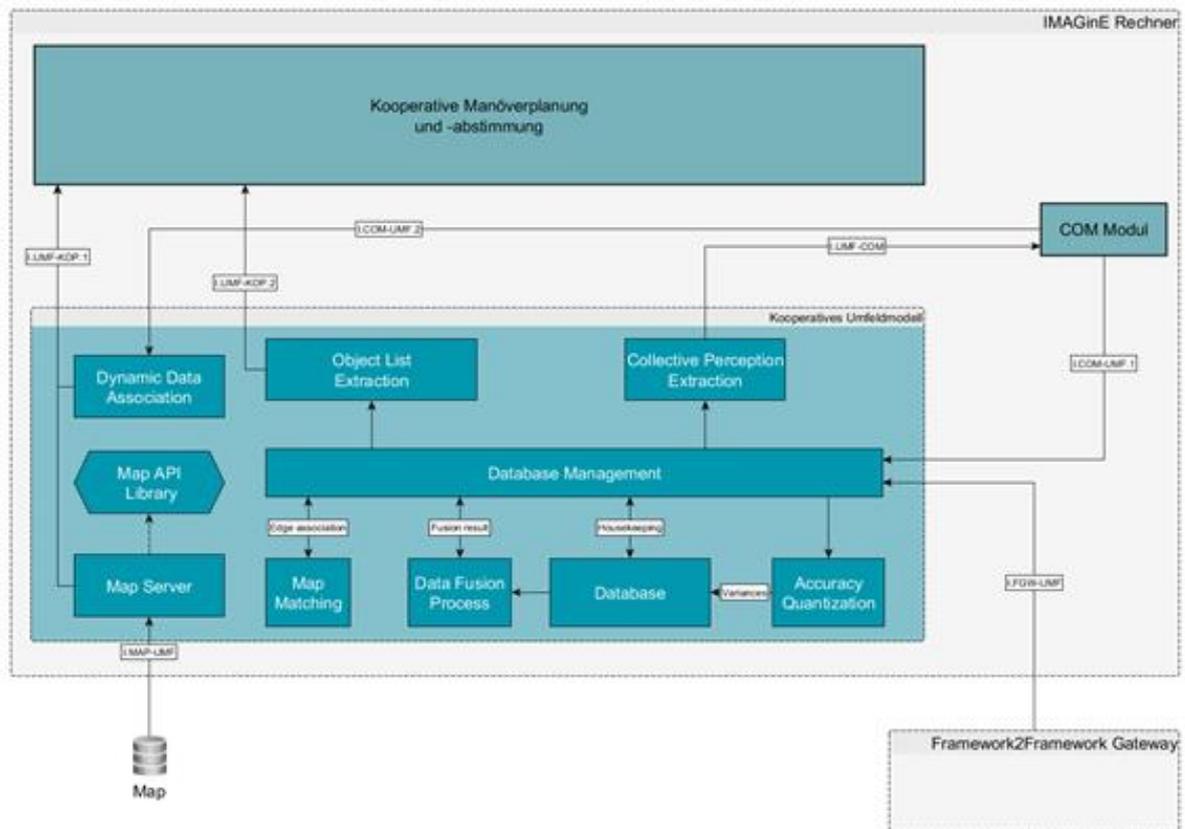


Abbildung 25: Komponenten des IMAGinE-Umfeldmodells

Nachfolgende Abbildung zeigt den unterschied der detektierten Objekte zwischen Ego-Sicht (nur mit boreigener Sensorik) und der mit Erweiterten Umfeldmodell.

Ego-Sensorsicht



Erweitertes Umfeldmodell



Abbildung 26: Unterschied Ego-Sicht und Erweitertes Umfeldmodell (© Car2Car Communication Consortium)

5.4 TP4: System- und Fahrzeugintegration

5.4.1 Integration des rollenbasierten Manöverabstimmungskonzepte

Im IMAGinE Projekt wurden 2 unterschiedliche Konzepte untersucht:

- Trajektorien-basierter Ansatz
- Rollenbasierter Ansatz

Beim Trajektorien-basierter Ansatz tauschen die kommunikationsfähigen Fahrzeuge Trajektorien aus. Unterschieden werden dabei die Referenztrajektorie, die Wunschtrajektorie und ggf. eine Alternativ Trajektorie. Beim rollbasierten Abstimmungskonzept verhandeln die Fahrzeuge nicht über das WIE, wie beim trajektorienbasierten Konzept; sondern über das WAS. D.h. wer übernimmt welche Rolle, z.B. Front oder Rear Vehicle.

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht den unterschied beider Konzepte.

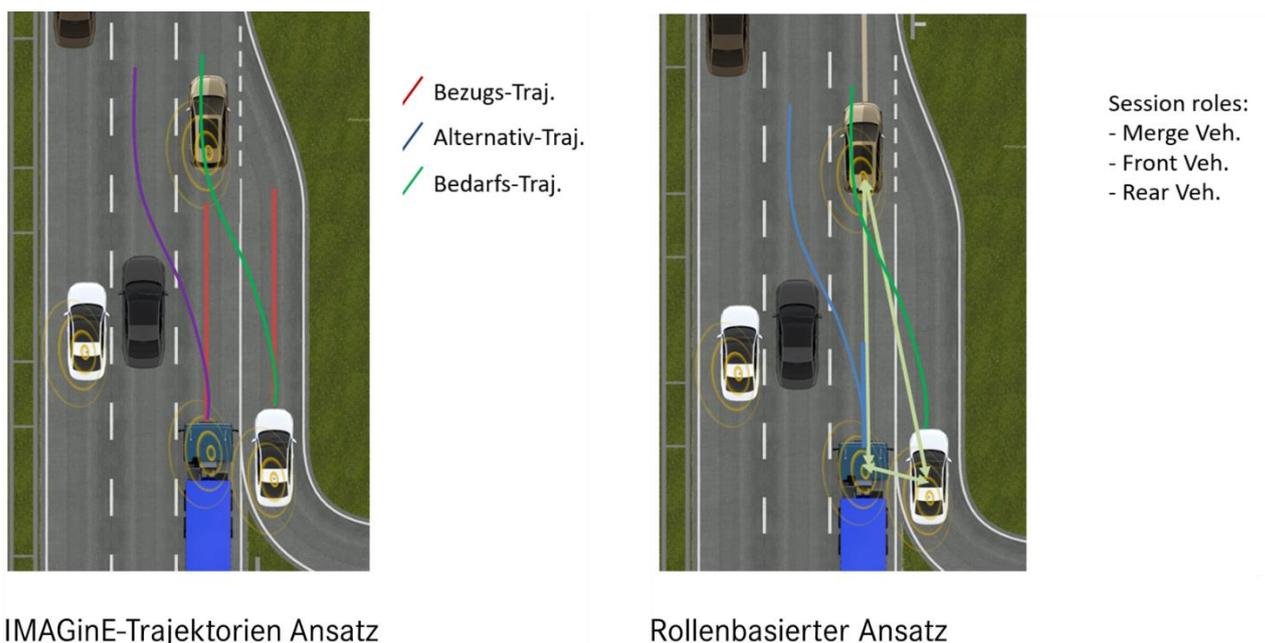


Abbildung 27: Abstimmungskonzepte (© Car2Car Communication Consortium)

Folglich resultieren die zu fahrenden Trajektorien aus den Rollen, den beabsichtigten Manövern und natürlich aus der jeweiligen Funktion selbst. Das rollenbasierte Konzept kann auf die meisten kooperativen Funktionen im Rahmen von IMAGinE übertragen werden.

Dieses Abstimmungsverfahrens kann die Session auf längere Zeit aufrechterhalten werden. Hierdurch werden die Rollen und States untereinander synchronisiert. Das Verhalten der Verkehrsteilnehmer resultiert aus der Rolle, dem State und der Funktion.

Wie im vorherigen Abschnitt präsentiert, basiert dieses Manöverabstimmungskonzept über die Abstimmung der Rollen. Dieses rollenbasierte Verfahren wurde mit verteilten Zustandsautomaten umgesetzt.

In der Abbildung 28 sind die Fahrzeug-Zustände und die Teilnehmer visualisiert, also Front – Rear und Merging-Leader (Ego)

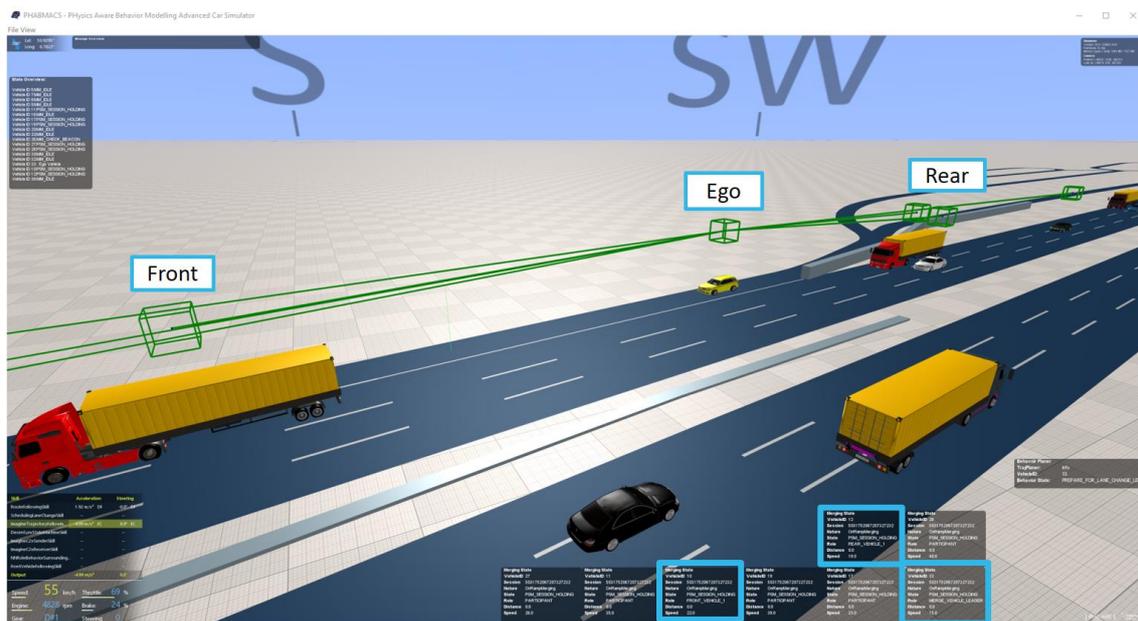


Abbildung 28: Kooperations-Session in der Simulation

Die Eigenschaften dieses Abstimmungsverfahrens kurz im Überblick:

- Die Session kann auf längere Zeit aufrechterhalten werden.
- Die Rollen und States sind untereinander synchronisiert
- Das Verhalten des Verkehrsteilnehmers resultiert aus dem Rolle, dem State und der Funktion

Kommunikationsmechanismen

Funktion F1

Um die Welt mit den Augen der anderen sehen zu können ist Kommunikation essentiell. Doch wie kann man diesen Prozess auf einer abstrahierten Ebene beschreiben? Bei der Funktion F1 beispielsweise werden die Eingangsgrößen vom Trajektorienplaner bereitgestellt. Die Ausgangsgrößen bilden kostenbehaftete Bewertungen der jeweiligen Lücken für das Einfädeln. Wir haben die Kernmodule des Kommunikationsprozesses, wie Trajektorienhandling, den Updateprozess und das Handling der Kommunikation selbst, identifiziert (Abb. 5.1.1)

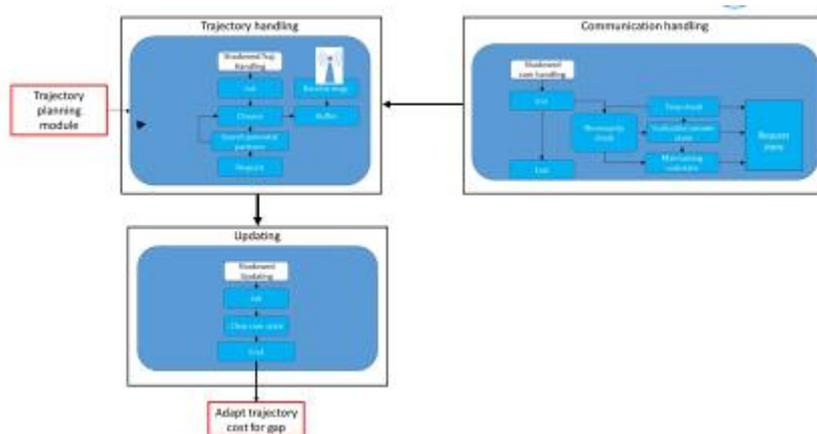


Abbildung 29: Generische Abbildung des Ablaufs der Kommunikationsprozesse

Die Master State-Machine des Egofahrzeugs interagiert mit den Zustandsautomaten der CMP Protokolle der anderen Fahrzeuge.

Abstraktion der Kommunikationsprozesse über CMP

Der grobe Ablauf zeigt die Abbildung 30.

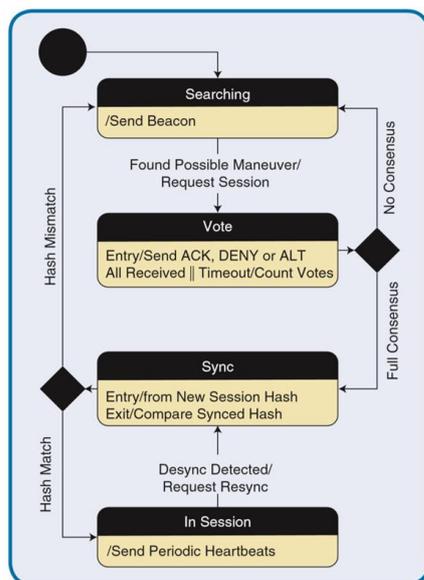


Abbildung 30: Abstrahierter Ablauf des Kommunikationsprozesses über CMP [7]

Zunächst werden mögliche Kooperationspartner gesucht, in dem beacon messages vom Egofahrzeug verschickt werden

Anschließend erfolgt die Koordination mit folgenden Schritten

- Abstimmungsrunde der zwischen den potentiellen Kooperationspartner, die entweder zustimmen oder ablehnen (VOTE)
- Um die Abstimmung abzuschließen, erfolgt eine Synchronisierung und Sessions werden aufgebaut (SYNC)
- Bei der IN SESSION garantiert ein kontinuierlicher Heartbeat die Synchronität während der Session.

Die Funktionen werden jeweils mit verteilten Zustandsautomaten realisiert. Die Funktion F1 wird durch Funktionszustände Einfädelvorgang Initieren, Trajektorienplanung und die dann die Manöverausführung bis zum Ende des Einfädelvorgangs. Ist ein Einfädeln nicht möglich wird das Fahrzeug auf der Einfädelspur bis zum Stillstand abgebremst und anschliessend wartet das Fahrzeug auf eine geeignete Lücke. Die Situationsanalyse hier links unterstützt die Zustandsübergänge. Elemente der Situationsanalyse sind die Lückendetektion, die Lückenbewertung sowie deren Prädiktion Aus der Lückenbewertung kann die Notwendigkeit einer Kooperation oder eben keine abgeleitet werden. Natürlich spielen auch die Zeit bzw. der Weg bis zum Einfädeln eine wichtige Rolle und ist Kooperation notwendig werden die Sessions aufgebaut mit eindeutigen Session IDs.

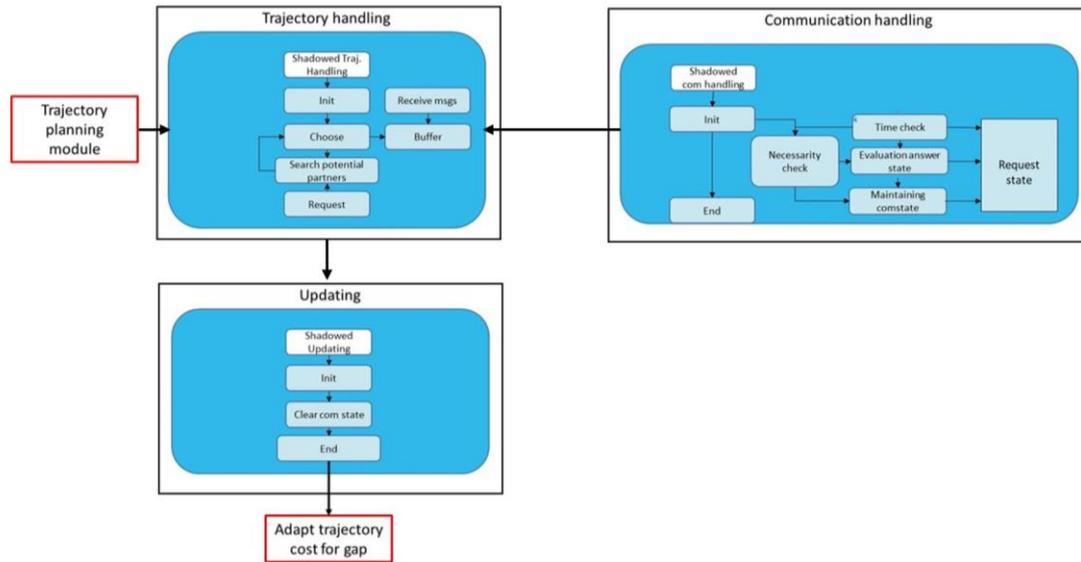


Abbildung 31: Verteilten Zustandsautomaten

Elemente der Situationsanalyse sind die Lückendetektion, die Lückenbewertung sowie deren Prädiktion. Aus der Lückenbewertung kann die Notwendigkeit einer Kooperation oder eben keine abgeleitet werden. Natürlich spielen auch die Zeit bzw. der Weg bis zum Einfädeln eine wichtige Rolle. Und ist Kooperation notwendig werden die Sessions aufgebaut mit eindeutigen Session IDs.

Abstrahiert sehen die Zustandsautomaten wie hier dargestellt ist aus. Zusätzlich zur Funktion und der Situationsanalyse wird die Manöverausführung durch eine Reglerkaskade realisiert. High Level Ctrl liefert z.B. die Referenzpunkte, die vom Low Level Controller angefahren werden.

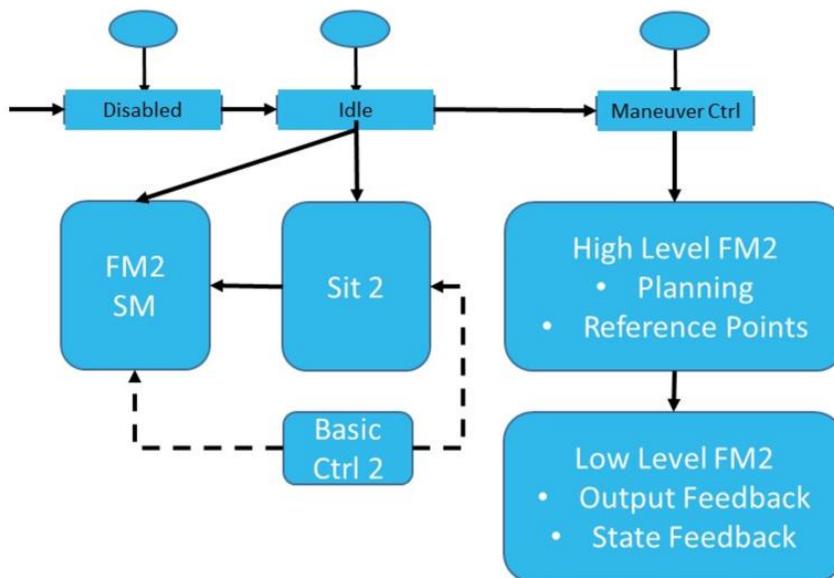


Abbildung 32: Abstrahierter Zustandsautomat

Beim Platooning sind folgende Zustände möglich

- das Anschliessen bzw. Aufschliessen,
- das Fahren im Platoon,
- das Verlassen des Platoons
- und das Beenden des Platoons.

Die Situationsanalyse für diese Funktion, also das Merging setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen

- das Erkennen eines Spurwechsels,
- eines Überholvorgangs, oder das Abbremsen.
- Zusätzlich werden Information aus der Infrastruktur bzw. einer Karte berücksichtigt, z.B. durchgezogene Linie.
- Zusätzlich ist der Fahrzustand in dem sich das Fahrzeug befindet wichtig (z.B. im ACC Modus) und geht deshalb sowohl in den Funktionsblock als auch in die Situationsanalyse ein.

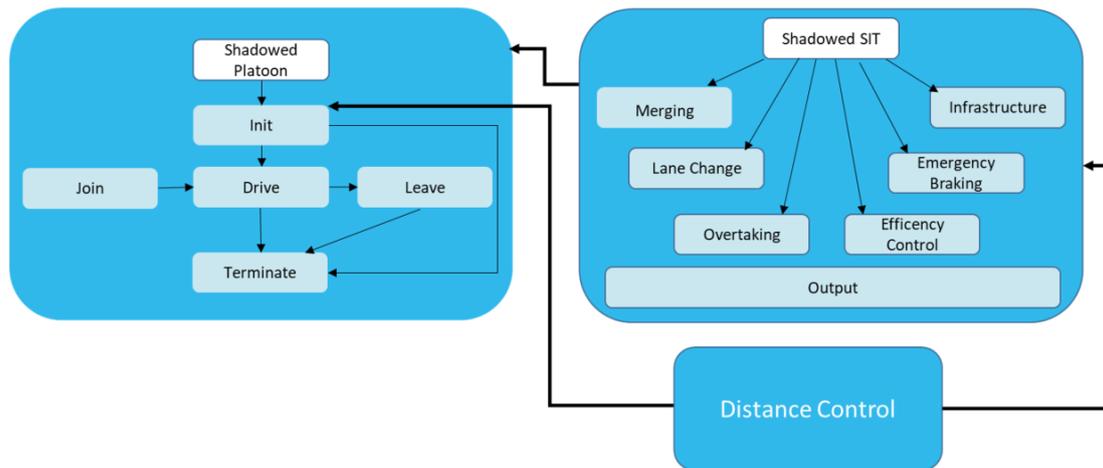


Abbildung 33: Zustandsautomat Platoon

Abstrahiert lässt sich das so ganze darstellen. Details kann ihnen Dr. Ilja Radusch vom DCAITI erklären.

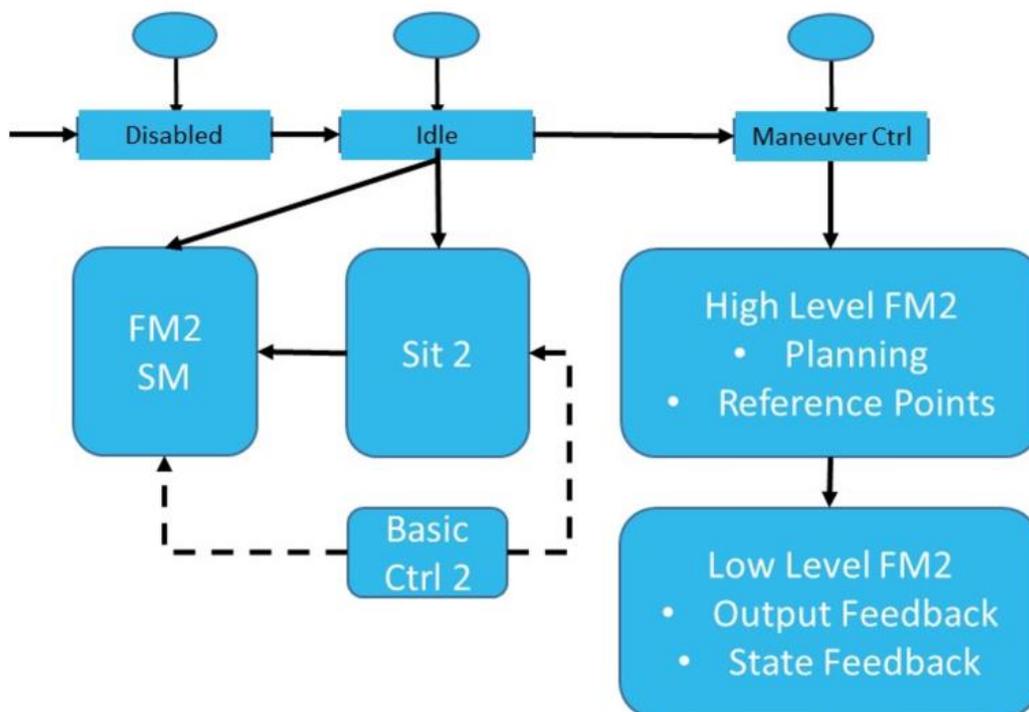


Abbildung 34: Zustandsautomaten FM2

Um das Einfädeln oder nicht einfädeln in eine Fahrzeugkolonne oder ein Platoon zu realisieren haben wir die Zustandsautomaten gekoppelt.

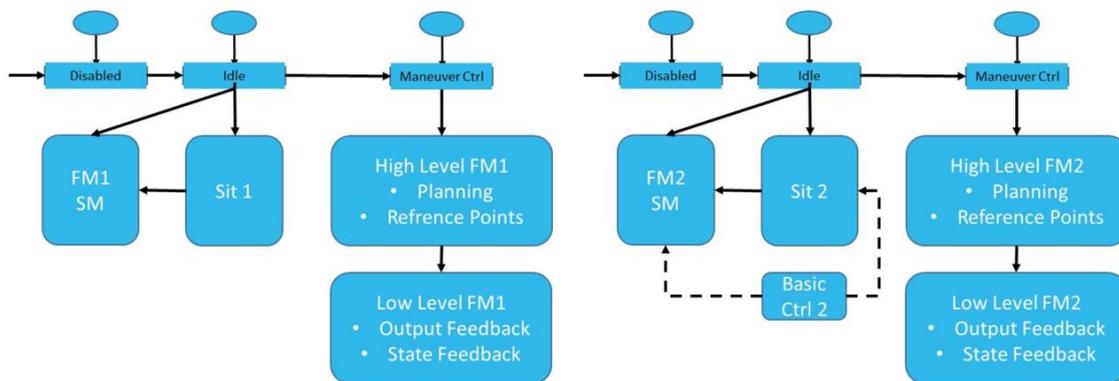


Abbildung 35: Gekoppelte Zustandsautomaten

5.4.2 Simulationsergebnisse

Dargestellt ist das Ego Fahrzeug, die Fahrzeugkolonne bzw. den Platoon. Sowie die Prädiktion der Kolonnenfahrzeuge in einem gewissen Prädiktionshorizont, dieser kann variabel eingestellt werden eröffnet Möglichkeiten für eine genauere Analyse. Bei diesen Ergebnissen war der Prädiktionshorizont 15 – 17 sec.

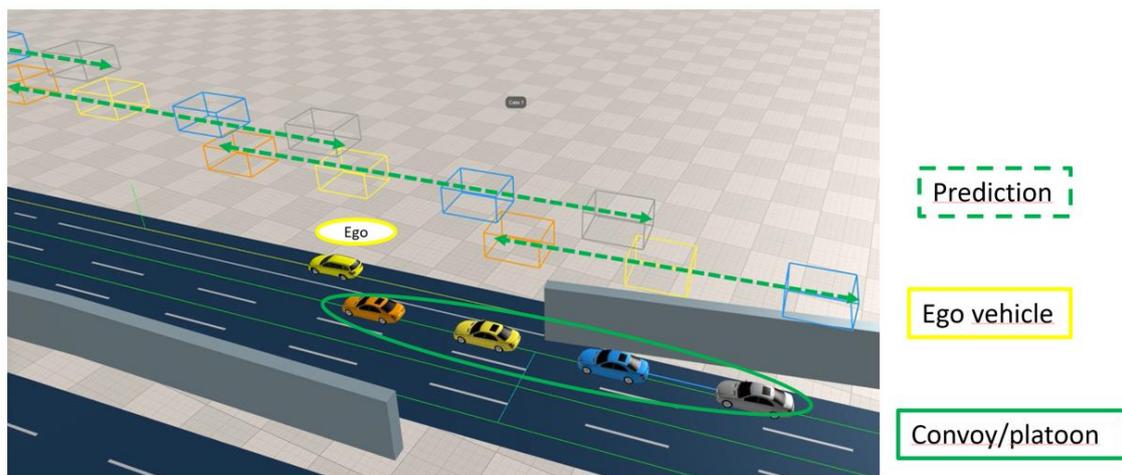


Abbildung 36: Einfädelvorgang in eine Fahrzeugkolonne/Platoon

Nachfolgende Abbildung zeigt die Möglichkeiten zur Kooperation eines Einfädlers mit einem Platoon auf der Hauptfahrbahn:

- Einfädeln vor dem Platoon (rot)
- Einfädeln in zwischen dem Platoon (weiß)
- Einfädeln hinter dem Platoon (grün)

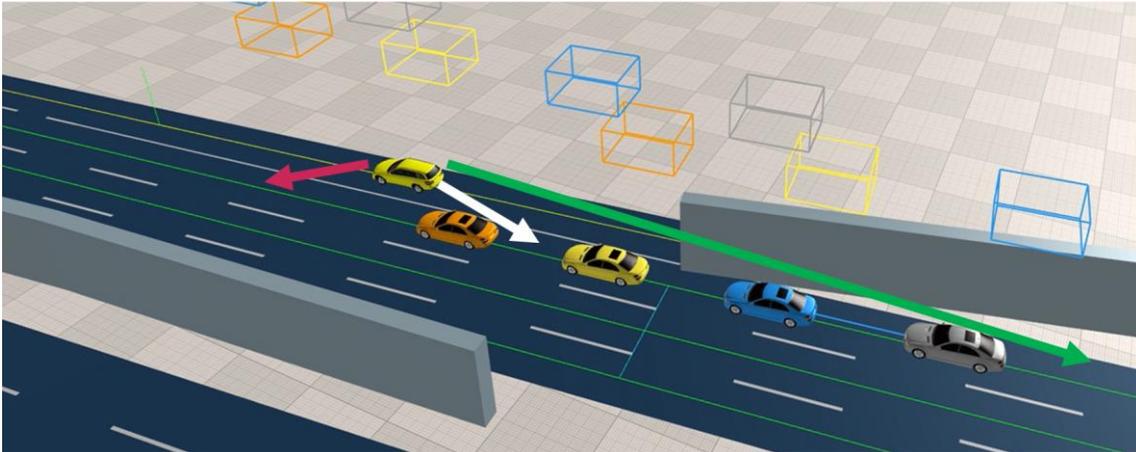


Abbildung 37: Möglichkeiten zum Einfädeln in eine Fahrzeugkolonne oder in ein Platoon

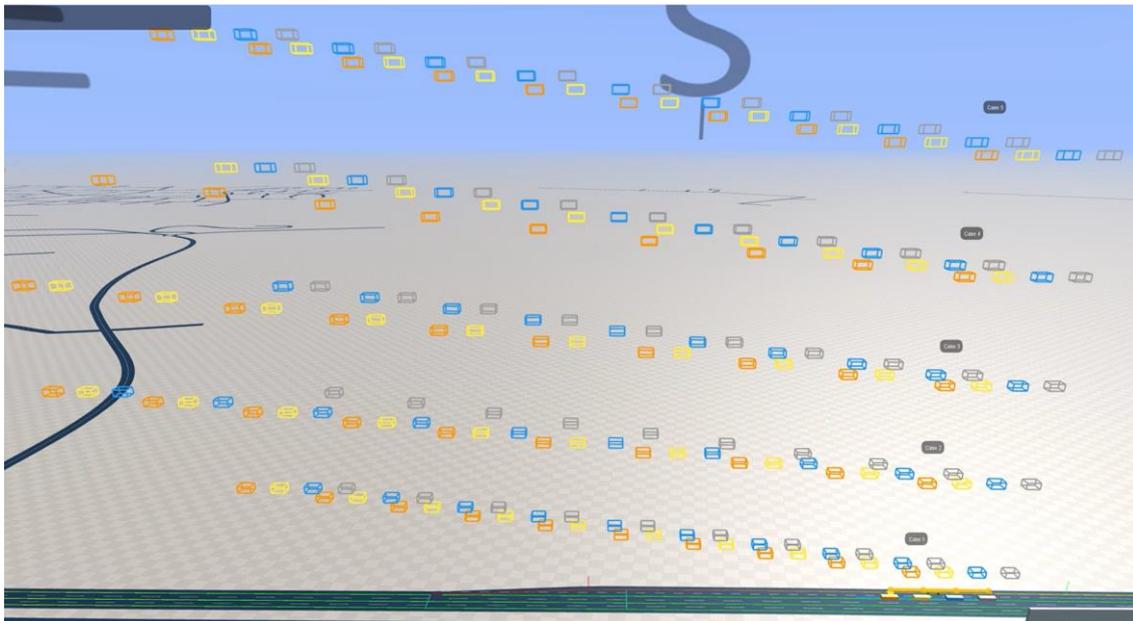


Abbildung 38: Prädiktion der Rollen als Use-Cases

Hier sehen wir die vom Egofahrzeug geplanten und bewerteten Trajektorien. Diese lassen sich unterteilen in valide, also kollisionsfrei fahrbare Trajektorien und optimale Trajektorien, im Sinne des Kostenfunktionalis des Egofahrzeugs.

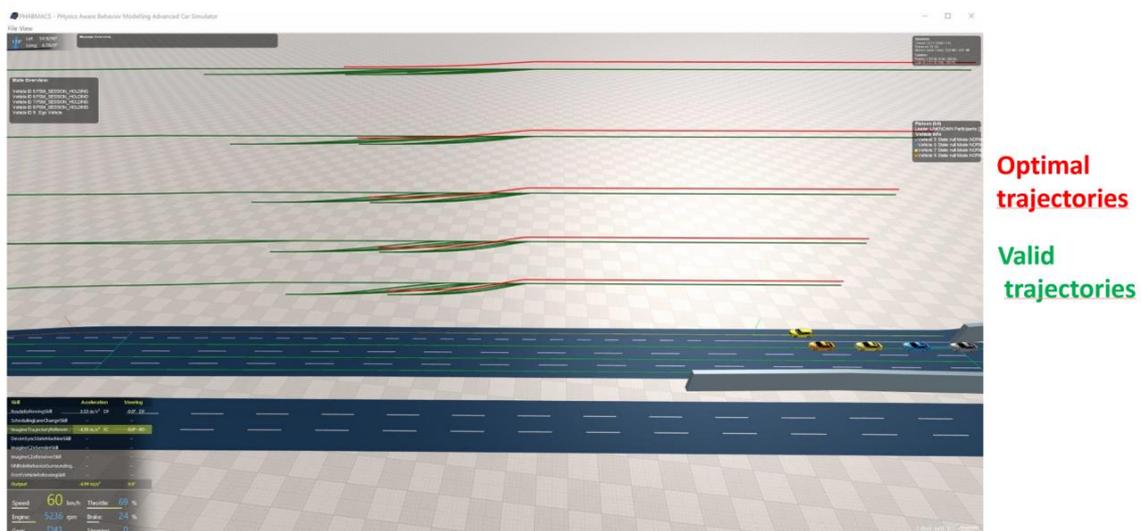


Abbildung 39: Trajektorienplanung und -bewertung

Wie das ganze ablaufen könnte zeigt das folgenden Beispiele als Screenshots vom Video (Abb. 39-41).

In diesem Fall waren die Abstände, also die Lücken zu klein bzw. keines der Fahrzeuge war zu einer Kooperation bereit und das Egofahrzeug lässt die Fahrzeugkolonne vorbei und fädelt dahinter ein.

Einfädeln in eine Fahrzeugkolonne

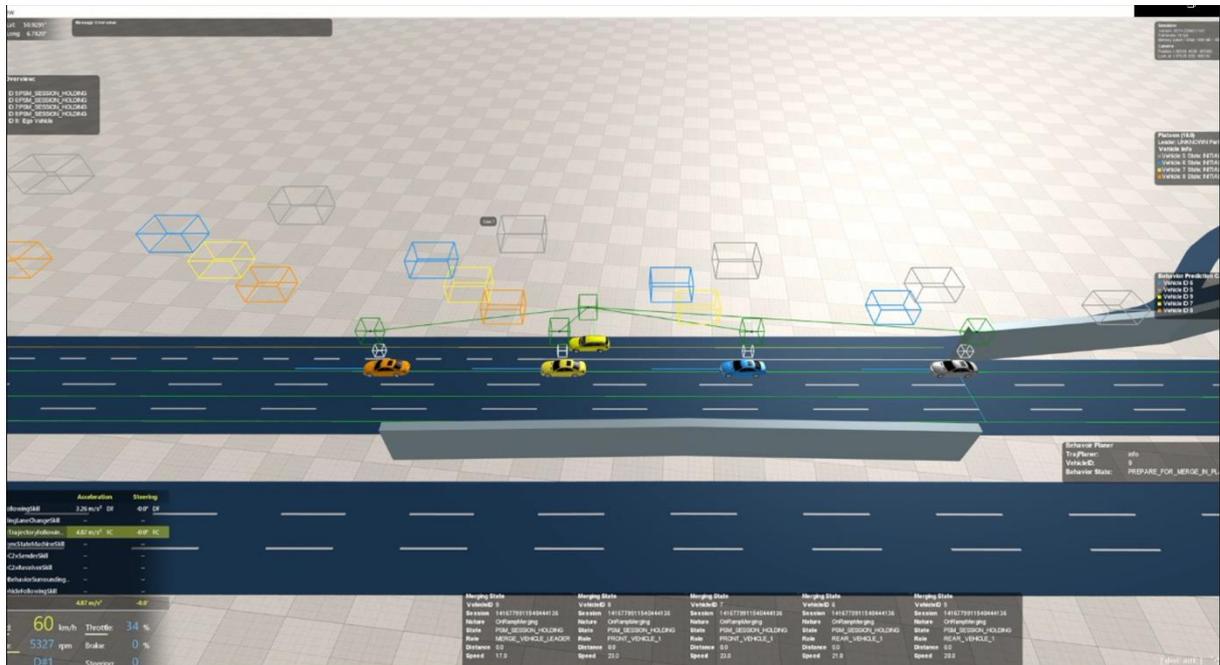


Abbildung 40: Aufgebaute Session zum Kooperieren

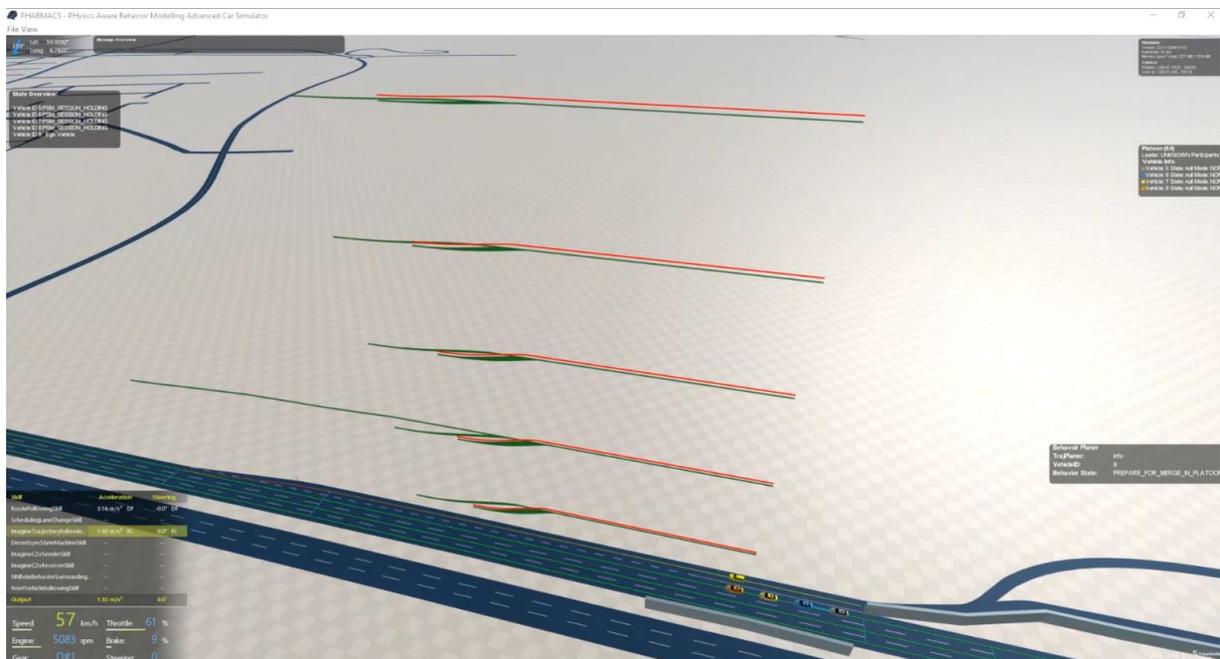


Abbildung 41: Trajektorienbewertungen der Situation

5.5 TP5: Evaluierung und Erprobung

5.5.1 Evaluation F1

Mercedes-Benz verwendet zur Evaluation der technischen Komponenten die Simulationsumgebung PHABMACS, welche vom Fraunhofer-Institut FOKUS sowie dem DCAITI entwickelt wurde. Die Grundlage der Simulation bildet das Eclipse MOSAIC, welches bspw. das Zeitmanagement im Verbundsystem übernimmt. Diese Basis kann mit weiteren Elementen wie das Kommunikationsmodul, für die Untersuchungen zur Kanallast mit OMNeT++ sowie der 3D Visualisierung erweitert werden.

Die Funktion F1 „Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen“ wurde in der Simulationsumgebung PHABMACS mit einem eingebundenen Realdatensatz evaluiert. Zur Kopplung von Simulation und Realdaten wurde die Simulation um ein weiteres Modul erweitert. Diese kann zuvor aufgenommene reale Fahrzeuge in der Simulation wiedergeben, sodass ein simuliertes „Echtwelt-Szenario“ entsteht.

Die untenstehende Abbildung zeigt den Einfädelbereich in der Simulation. Die Fahrzeuge, welche sich auf den Hauptfahrbahnen befinden, folgen zuvor real aufgenommenen Trajektorien.

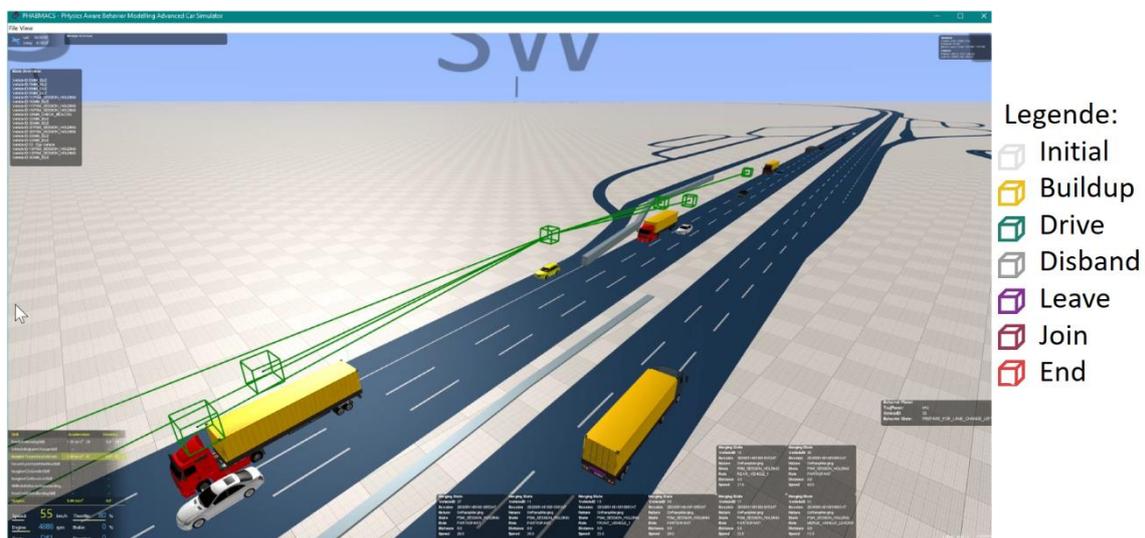


Abbildung 42: PHABMACS Simulation mit Real-Daten

Das Ego-Fahrzeug wurde ebenfalls von dem Datensatz aufgezeichnet und befindet sich auf der Einfädelspur.

Das Ego-Fahrzeug aus dem realen Datensatz wurde durch ein simuliertes Fahrzeug ersetzt. Die Startbedingungen, wie die Geschwindigkeit, die Orientierung oder auch die Zeit des Erscheinens, wurden aus dem Realdatensatz entnommen.

Ergebnisse

Wir konnten feststellen, dass bereits eine geringe V2X-Durchdringung der Verkehrsteilnehmer die Qualität des Umfeldmodells sowie der detektierten Objekte deutlich verbessern kann. Im Bereich der hohen v2x-Ausstattungsrate (70% bis 90%) werden ca. 90 % aller Fahrzeuge detektiert. Bei einer Durchdringung von 50 bis 60 % sind dies etwa 80 %. Bereits bei einer Ausstattungsrate von 10 – 40 % werden im Schnitt 75 % aller Objekte detektiert.

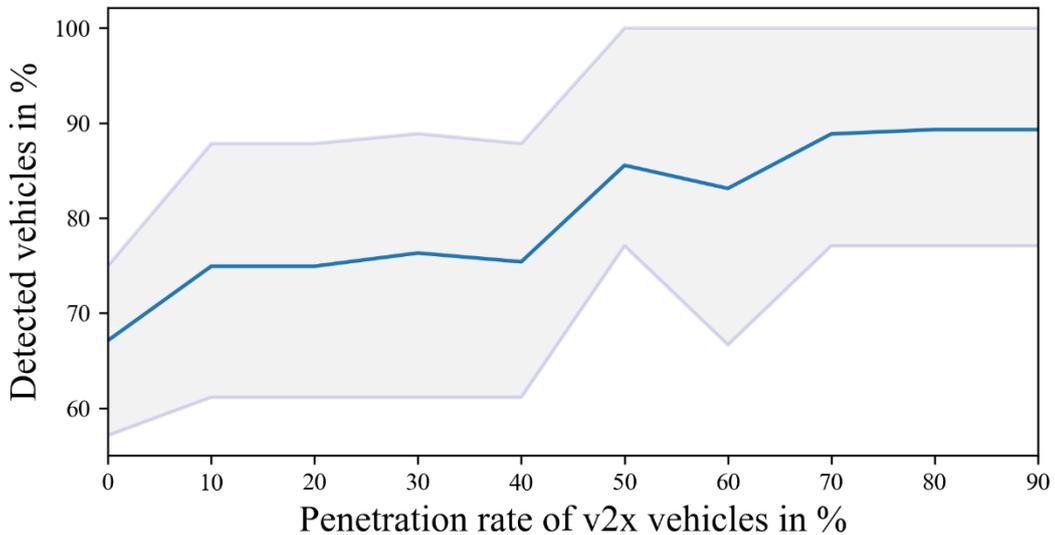


Abbildung 43: Detektierte Objekte in Abhängigkeit der v2x-Ausstattungsrate [8]

Ferner wurden die Auswirkungen des erweiterten Umfeldmodells in Bezug auf die Systemauswirkung des Einfädlers untersucht. Nachfolgendes Diagramm zeigt die Beschleunigungswerte für eine v2x-Ausstattungsrate von 0 %, 50 % und 80 %.

v2x rate [%]	driving parameters			safety parameters	
	$\overline{a_x}$ [m/s ²]	$\overline{a_y}$ [m/s ²]	\overline{v} [m/s]	min(dist) [m]	min(ttc) [s]
0	1.25	0.23	19.60	12.08	3.01
50	1.13	0.17	19.64	13.94	3.30
80	0.92	0.13	19.06	23.92	5.29

Abbildung 44: Einfädelparameter mit variierender V2X-Ausstattungsrate [8]

Es ist zu vermerken, dass die longitudinalen Beschleunigungswerte durch die zusätzlichen V2X Umfeld-Daten bei einer Ausstattungsrate von 80% um 0.33 m/s² reduziert werden konnten. Das Fahrzeug konnte rechtzeitig die Lücke anfahren.

Fazit

Bereits eine geringe V2X Ausstattungsrate der umliegenden Fahrzeuge kann signifikant zur Verbesserung des Umfeldmodells und somit der Detektierung von Objekten, gerade in Verdeckungsbereichen, beitragen. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass durch ein v2x erweitertes Umfeldmodell der Sicherheitsabstand erhöht werden kann und die Beschleunigungswerte beim Einfädeln gleichzeitig reduziert werden können.

5.5.2 Evaluation F2

Für die Untersuchungen wurde Eclipse MOSAIC verwendet. Die Plattform koppelt zur Laufzeit Simulatoren verschiedener Domänen, so z.B. PHABMACS für Fahrzeugdynamik, OMNeT++ für Kommunikationsuntersuchung sowie SUMO für den Umgebungsverkehr. Darüber hinaus existiert der Application Simulator für die Modellierung der Applikationslogik bzw. für den Kontext der Netzlastuntersuchung im Projekt IMAGinE die Modellierung der Kommunikationsbedarfe (Sendezeitpunkte, Größe von V2X-Nachrichten) verschiedener Anwendungen. Somit kann die F2 zunächst einzeln verifiziert und danach im Zusammenspiel mit anderen Anwendungen in reale Verkehrssituationen untersucht werden. Nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau von Eclipse MOSAIC.

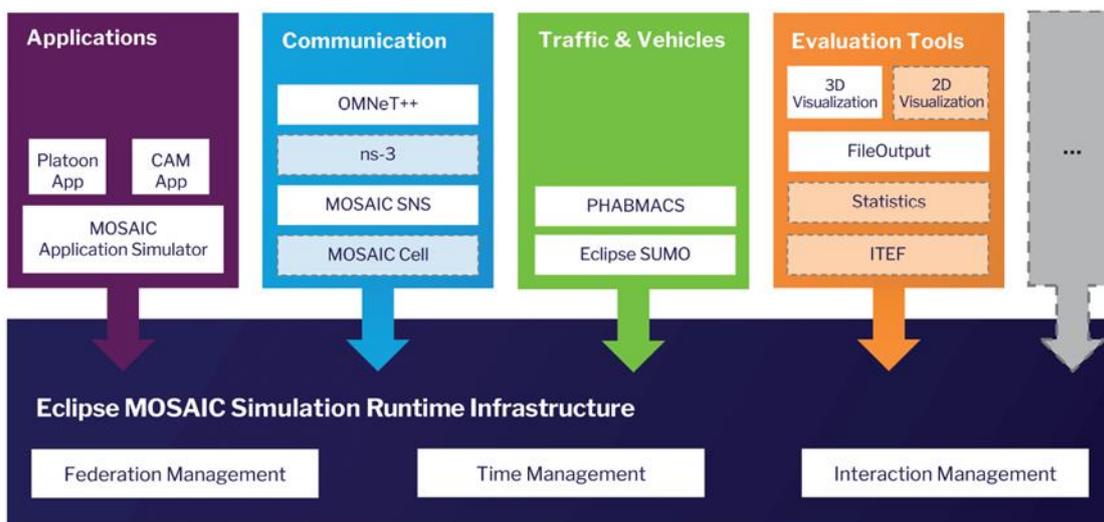


Abbildung 45: Aufbau Eclipse MOSAIC

5.5.2.1 Verifikation des Rollenbasierten Protokolls

Zur Untersuchung von Funktion und Wirkung wurden folgende Verifikationsszenarien des rollenbasierten Protokolls für Platooning in der Simulationsumgebung PHABMACS gemäß Kapitel 5.2 implementiert.

- Platoon initial aufbauen mit 3-x Fahrzeugen
- Ein Fahrzeug tritt dem Platoon bei, von beiden Enden
- Ein Fahrzeug verlässt das Platoon, aus jeder Position
- Auflösen des Platoons
- Gemeinsames Bremsen / Beschleunigen im Platoon
- Störfahrzeug verzögert Aufbau des Platoons
- Störfahrzeug verhindert Aufbau des Platoons



Abbildung 46: PHABMACS zur Verifikation der sieben Verifikationsszenarien

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Umsetzung in der Simulationsumgebung PHABMACS.



Abbildung 47: Aufnahme des roten Fahrzeugs in ein bestehendes Platoon



Abbildung 48: Drei Fahrzeuge im Platoon

5.5.2.2 Netzlastuntersuchungen

Verkehrsszenario

Für die Untersuchung der Netzauslastung während der Verwendung von F2 im Zusammenspiel mit weiteren Basisfunktionen (Day-One Use Cases) wurde ein realitätsnahe stauähnliches Verkehrsszenario auf einer Autobahn nachmodelliert, zu sehen in Abbildung 49.



Abbildung 49: Streckenabschnitt Girona, simulierter Straßenverkehr

Im Kontext von Eclipse MOSAIC besteht ein Szenario aus einer Beschreibung des Verkehrs (Abfahrtszeit und Routen der einzelnen Fahrzeugströme) und der Konfiguration zusätzlicher Modelle, wie z. B. der auf den Fahrzeugen laufenden Anwendungen, der Durchdringungsrate, der Kommunikationsparameter und der Straßeninfrastruktur (bspw. Standort von RSUs). Die Erstellung und Kalibrierung des Verkehrsszenarios werden in den nachfolgenden folgenden Absätzen beschreiben.

Die Verkehrsnachfrage wurde anhand von realen Mautdaten eines ganzen Tages erstellt, die von der Mautstraßenbetreibergesellschaft Abertis Infraestructuras im Rahmen des Forschungsprojekts INFRAMIX zur Verfügung gestellt wurden. Das Verkehrsmodell wurde entsprechend kalibriert, um eine realistische Verkehrsnachfrage auf dem Autobahnabschnitt nachzustellen. Ziel war es hierbei, verschiedene Verkehrssituationen wie freie Fahrt, hohe Verkehrsdichte, und dichter Verkehr mit Stau, in die Untersuchung der Netzauslastung einzubeziehen. Dazu wurde die Kalibrierung in zwei Schritten durchgeführt: Zunächst wurden grundlegende Fahrzeugparameter wie Fahrgeschwindigkeit und Folgeverhalten (zeitlicher Abstand) durch iterative Simulationsläufe und Anpassung der Parameter ermittelt. Zweitens wurde das Spurwechselmodell der Fahrzeuge manuell kalibriert, um das Verhalten (und damit auch Staubildung) an Auffahrten realistisch nachzubilden.

Im ersten Schritt haben wir ein großräumiges Verkehrsszenario auf der Autobahn AP7 mit mehr als 250.000 Fahrzeugen über einen Zeitraum von 24 Stunden simuliert. Die zur Verfügung gestellten Mautdaten enthielten detaillierte Informationen zu jedem einzelnen Fahrzeug, das den Autobahnabschnitt betrat und verließ. Diese Daten umfassten die Zeit und den Ort der

Einfahrt in die Autobahn und der Ausfahrt aus der Autobahn sowie die Anzahl der Achsen, die jedes Fahrzeug hatte. Die Einfahrtsdaten wurden zur Erstellung der Verkehrsnachfrage der Simulation verwendet, die Achsenzahl diente zur Schätzung des Fahrzeugtyps (Pkw, Lkw oder Motorrad). Anschließend führten wir die Verkehrssimulation iterativ mit diesen Ausgangsdaten durch und passten die Fahrzeugeigenschaften so lange an, bis die Reisezeit der Fahrzeuge möglichst gut mit den realen Werten übereinstimmte.

Für die letztendliche Untersuchung der Netzauslastung haben wir uns dazu entschieden, die Simulationen nur auf einem begrenzten Abschnitt der AP7-Autobahn von 20 km Länge durchzuführen. Dazu extrahierten wir den Verkehr, indem alle Fahrzeuge aufgezeichnet wurden, die in das begrenzte Testgebiet einfuhren. Weiterhin reduzierten wir die Zeitspanne für die Untersuchungen auf einen kurzen Zeitabschnitt zwischen 8:30 und 11:30, was zu einem Szenario mit einem Verkehrsaufkommen von insgesamt 20.528 Fahrzeugen führte. Das großräumige Szenario, die gesamte AP7 und der Abschnitt des Untersuchungsszenarios sind in dargestellt.

In einem zweiten Schritt war es notwendig, einzelne Parameter des Spurwechselmodells im Verkehrssimulator SUMO anzupassen. Mit den Standardwerten war das Spurwechselverhalten nicht in der Lage, realistische Verkehrsmuster und Stausituation abzubilden. Hierbei wurden diverse Parameter des Spurwechselmodells in zahlreichen Experimenten manuell angepasst, bis die Fundamentaldiagramme einen Kapazitätsabfall aufgrund der erhöhten Verkehrsnachfrage zeigten. Die Erhöhung der Parameter $lcSpeedGain$ (höhere/geringere Wahrscheinlichkeit, die Spur zu wechseln, um Geschwindigkeit zu gewinnen) und $lcAssertive$ (Akzeptanz geringerer Abstände für Spurwechsel bei dichtem Verkehr) führte schließlich zu einer realistischen Verteilung der Fahrzeuge auf alle Fahrspuren. Die letztlich erfolgreiche Kalibrierung des Verkehrs kann in Abbildung 50 gesehen werden – Speed-Contour-Plot zeigt Verringerung der möglichen Geschwindigkeit und Fundamental-Diagramm zeigt den "Capacity-Drop" um die Stautstelle.

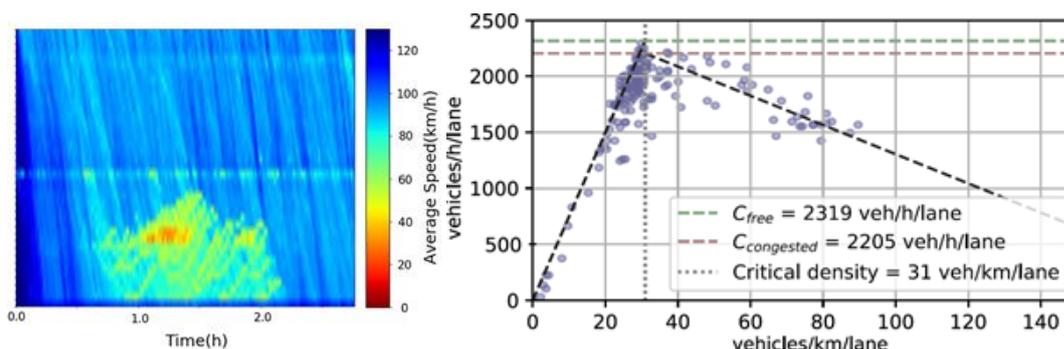


Abbildung 50: Raum-zeitlicher Speed-Contour-Plot und Fundamental-Diagramm für kalibrierten Verkehr

Anwendungsszenario und Kommunikation

Nach der Definition des Verkehrsszenarios müssen den Fahrzeugen die Anwendungen zugewiesen werden. Diese Anwendungen senden in definierten Zeitabständen Nachrichten fester Größe an alle Fahrzeuge in ihrem Umfeld. Je nach Kanalauslastung kommen diese bei anderen Fahrzeugen an oder nicht. Die dazu passende Metrik, das Packet-Delivery-Ratio (PDR), gibt an, wieviel Prozent der eigentlich gesendeten Nachrichten bei den zu erwartenden Empfängern angekommen sind. Für die Messung der PDR wurde ein Fahrzeug aus dem gesamten Verkehrsszenario zufällig ausgewählt, welches entsprechend als „Ego-Fahrzeug“ definiert wurde. Alle anderen Fahrzeuge, die sich in einem Umkreis von 500 m um das Ego-Fahrzeug herum befinden, senden während der Simulation kontinuierlich Nachrichten der Typen CAM, CACCM, und CMM. Nachrichten-Grundlast wird erzeugt durch CAMs für etablierte V2X Funktionen. F2 Platooning wird ermöglicht durch datensparende Collaborative Maneuver Messages (CMMs) (Rollen-Protokoll) und darüber hinaus automatisierbar durch CACCMs (Cooperative Adaptive Cruise Control).

Die entsprechenden Nachrichtengrößen und ihre Sendefrequenz sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 4: Durch Applikationen verwendete Nachrichtentypen und ihre Spezifikation

NACHRICHTENTYP	AUSSTATTUNG	GRÖSSE	FREQUENZ
CAM	Alle Fahrzeuge	350 Bytes	2.5 Hz
CACCM	Platoon	50 Bytes	10 Hz
CMM	Platoon	100 Bytes	5 Hz

Das Ego-Fahrzeug wurde so ausgewählt, dass es während der Fahrt in Situationen unterschiedlicher Verkehrsdichten kommt. So startet es mit wenig Fahrzeugen in der näheren Umgebung, kommt dann aber in Stausituationen mit bis zu 120 Fahrzeugen in maximalem Abstand von 500m, die als ebenfalls potenzielle Sender die Kanallast beeinflussen können. Die Anzahl der Fahrzeuge in der näheren Umgebung in Abhängigkeit von der Simulationszeit ist in Abbildung 51 dargestellt.



Abbildung 51: Benachbarte potentiell kommunizierende Fahrzeuge im Bereich des Ego-Fahrzeugs

Die Simulation der Nachrichtenkommunikation behandelt alle unteren Schichten des OSI-Modells ab der Transportschicht. Als Protokoll kommt hierbei UDP zum Einsatz. Hierbei wurde kein Multi-hop zwischen den Fahrzeugen angenommen. Nachrichten werden stets mit einem Single-hop-Broadcast versendet. Für den Nachrichtenaustausch werden auch keine Rückmeldungen der Empfänger modelliert. Eine Prüfung, ob Nachrichten bei potenziellen Empfängern (Fahrzeuge in der näheren Umgebung des Ego-Fahrzeuges) angenommen sind, findet in der Nachbereitung der Simulationsergebnisse statt. Dabei kann dann das bereits erwähnte Packet-Delivery-Ratio ermittelt werden. Die Kommunikationssimulation wurde mit dem Simulator OMNeT++ und der Modellbibliothek INET durchgeführt. Hierbei wurden für jeden Knoten (Sender/Empfänger) die in Tabelle 5 angeführten Parameter konfiguriert.

Tabelle 5: Parametrierung der Kommunikation

ASPEKT	PARAMETRIERUNG
Sicherungsschicht	IEEE 802.11p
Bitrate	6 Megabit pro Sekunde
Trägerfrequenz	5,9 Ghz
Kanalnummer	4
Kanalbreite	10 MHz
Sendestärke	50 mW
Empfangsempfindlichkeit	-81 dBm

Evaluationsergebnisse

Ausgewertet wurde die Wirkung der Fahrzeugdichte, z.B. durch stockenden Verkehr auf die wichtige Kommunikationsgröße Packet Delivery Ratio (PDR) für die einzelnen Messages CAM, CMM, CACCM. Mit steigender Fahrzeugdichte steigt auch die Kanallast für Kommunikation, was sich durch Paket-Kollisionen negativ auf die PDR auswirken könnte. Grundsätzlich hängt die PDR vom Relevanzbereich (Distanz von Empfänger zum Sender) ab.

Das nachfolgende Diagramm zeigt daher die Anzahl der Fahrzeuge im Relevanzbereich um Ego-Fahrzeuge im Platoon auf denen die PDR gemessen wurde und die PDR, beide Werte aufgetragen über den zeitlichen Verlauf.

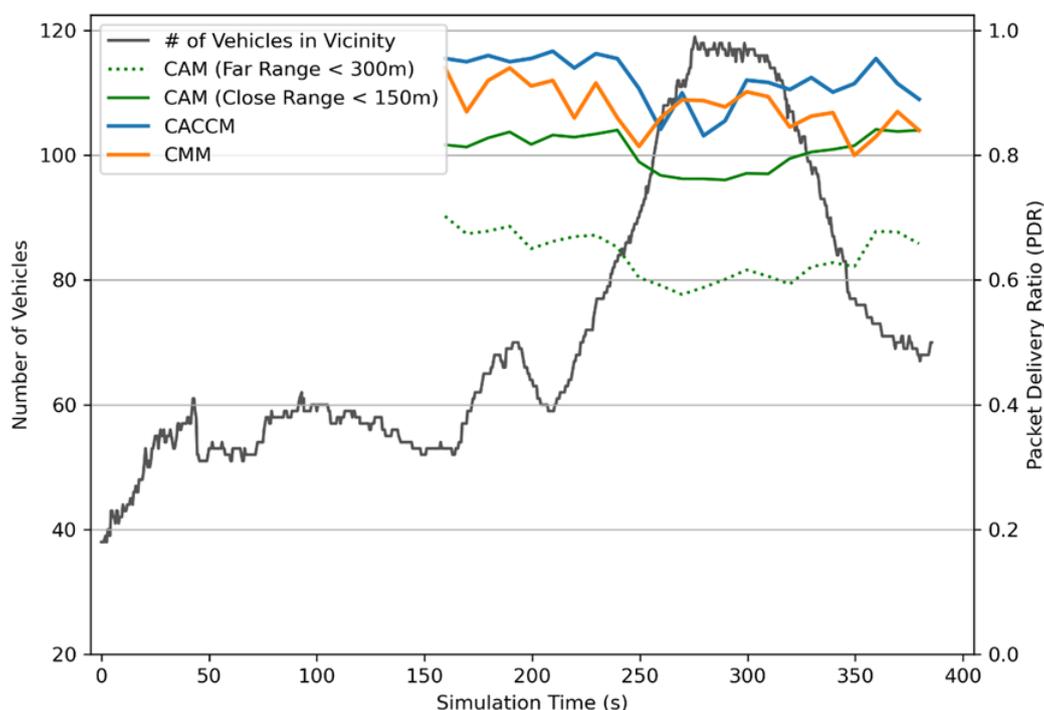


Abbildung 52: PDR für verschiedene Nachrichtentypen (rechte Achse) im Szenario Girona, zusätzlich als Referenz für die Verkehrsdichte die Anzahl der benachbarten Fahrzeuge zum Ego-Fahrzeug (linke Achse)

Das Diagramm zeigt zunächst noch einmal die Anzahl der Fahrzeuge, wie durch die Simulation choreografiert bis hin zu einer stauähnlichen Situation mit entsprechend hoher Kommunikationsdichte und dem nachfolgenden Abflachen dieses Staus. Von Interesse ist nun die PDR für die jeweiligen Nachrichtentypen im Vergleich zur Fahrzeugverkehrsdichte. CAMs ermöglichen sehr unterschiedliche Day-One Anwendungen wie z.B. (a) Einsatzfahrzeug-Warnung um Fahrzeuge weit im Voraus (zeitlich und örtlich) zu warnen, (b) Spur-Wechsel-Assistenz für Anwendung im Nahbereich. Deswegen werden für CAMs verschiedene Relevanzbereiche der erfolgreichen Kommunikation betrachtet – Far Range bis 300m, Close Range bis

150m. Maneuver-Nachrichten zur Bildung des Platoons CMM sowie für dessen CACC-Automatisierung mit CACCMs betreffen immer den näheren Bereich bis 150m.

Zusammengefasst zeigt das Diagramm, dass die Situation der hohen Kommunikationsdichte für CAMs zu leicht reduzierter PDR führt, besonders für weit entfernte Sender (Far Range mit PDR um 0.6 - 0.7). Sicherheitskritische CMMs und CACCMs können in ihrem Relevanzbereich zuverlässig zugestellt werden (PDR > 0.85). Aufgrund des periodischen Charakters der Kommunikation der untersuchten Nachrichtentypen kann gesagt werden, dass eine PDR von 1 (also hundertprozentig erfolgreicher Austausch aller Nachrichten) nicht zwingend erforderlich ist für das unbeeinträchtigte Funktionieren der Anwendungen. Einzelne Nachrichten können durchaus verfallen, wenn nachfolgende Nachrichten wieder empfangen werden. Dieser Umstand ist besonders für das abschließende Fazit relevant.

Fazit

Die Funktion F2 Platooning ist rollenbasiert durchgängig im Szenario möglich. CAMs erfahren bei hoher Fahrzeuganzahl eine leicht reduzierte PDR, wobei auf CAMs basierende etablierte V2X-Funktionen bei solchen PDR-Werten weiterhin darstellbar sind.

5.6 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen

- O. Sawade and I. Radusch, "Survey and classification of cooperative automated driver assistance systems," in 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2015 - Proceedings, 2016.
- O. Sawade, M. Schulze, I. Radusch, „Robust Communication for Cooperative Driving Maneuvers“, in IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 10 (3), 159-169, 2018.
- Lucas Eiermann , Florian Wirthmüller , Kay Massow , Gabi Breuel and Ilja Radusch: „Driver Assistance for Safe and Comfortable On-Ramp Merging Using Environment Models Extended through V2X Communication and Role-Based Behavior Predictions“, in Proceedings ICCP, Sep. 2020 .
- Lucas Eiermann, Nick Bühler, Dr. Gabi Breuel, Dr. Ilja Radusch, Prof. Hauswirth: „Trajectory Based Motion Planning for On-Ramp Merging-Situations Considering Extended - Evaluation Criteria“, in Proceedings ICCP, Sep. 2020.
- Lucas Eiermann, Oliver Sawade, Sebastian Bunk, Gabi Breuel and Ilja Radusch: „Cooperative automated lane merge with role-based negotiation“, in Proceedings IV, May 2020.

Unveröffentlichte Berichte

- Mustafa Safa Carici: "Lückendetektion und Bewertung", Praktikum 2019, unveröffentlicht.
- Mustafa Safa Carici: "Vergleich und Bewertung von Prädiktionsansätzen für Autobahnszenarien", Bachelorarbeit 2020, unveröffentlicht.
- Nick Bühler: „Trajektorienplanung, Trajektorienbewertung und Fahrzeugregelung“, Praktikum 2019, unveröffentlicht.
- Kathrin Gerhardus: „V2X-Kommunikationskonzept zur Manöverabstimmung bei Einfädelvorgängen in Autobahnszenarien“, Masterarbeit 2020, unveröffentlicht.
- Mario Ebersbach: „Berechnung des Prädiktionszeitraums zum Einfädeln an Autobahnauffahrten mittels Fahrzeugtrajektorien“, Bachelorarbeit 2019, unveröffentlicht.
- Sungeeta Singh: "Autonomes und kooperatives Einfädeln in eine Fahrzeugkolonne und in ein Platoon", 2022, mit Sperrvermerk.
- Sushmitha Honasoge Sudheendra: "V2X Network Simulation with Cooperative Maneuver Coordination for Autonomous Driving"
- Armin Vosoghi Marand: "Entwicklung eines Machine Learning Verfahrens zur Auswahl von Lücken beim autonomen Einfädelvorgang auf die Autobahn"
- Milos Mandic: "Prognose von rollen-adäquatem Fahrverhalten bezogen auf die Umgebungsfahrzeuge beim Einfädeln auf Autobahnen mittels künstlicher Intelligenz", 2022.

5.7 Abschlussveranstaltung

Die erzielten Projektergebnisse wurden im Rahmen von zwei Abschlusspräsentationen dargestellt.

- Online Präsentation 12.05.2022
- Präsenzveranstaltung 29.05.2022

Poster an der Präsenzveranstaltung

Gesamtüberblick stellt die für die Funktionen F1/F2 aus der Unfallstatistik abgeleiteten Motivation dar (Abbildung 53). Die Funktionsarchitekturen für F1, F2 und deren Kombination F12 sind jeweils als Zustandsautomaten dargestellt. Die Umsetzung dieser Funktionen in der Simulation. In unseren Arbeiten konnten wir die Funktionen F1/F2 und deren Integration exemplarisch umsetzen und in Simulationen evaluieren. Die Simulationen umfassten:

- umfangreiche, rein simulierte Szenarien
- die Integration von realen Verkehrsdatensätzen (zum Testen der Algorithmen ohne Kommunikation und Manöverabstimmung)
- sowie die Modifikation der Realdatensätze für die Interaktion zwischen den Fahrzeugen (zum Testen der Algorithmen mit Kommunikation und Manöverabstimmung)

Überblick der Funktion F1. Die Inhalte des Posters (Abbildung 54) sind:

- Motivation
- Situationsanalyse, insbesondere die Lückendetektion
- Verwendete Informationsquellen, wie erweitertes Umfeldmodell und V2X
- Verwendete Prädiktionsansätze (CVM vs. Neuronales Netz)
- Trajektorienplaner
- Manöverabstimmungskonzept (Session-Aufbau mit CMP-Protokoll)

Überblick der Funktion F2. In diesem Poster (Abbildung 55) wurden nachfolgende Themen adressiert:

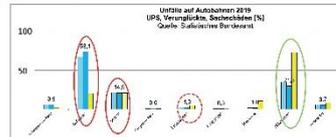
- Validierung der technischen Machbarkeit
- Umsetzung des rollenbasierten Protokolls für F2
- Grundsätzlicher Aufbau der Co-Simulation
- Validierungskonzept

Zusammenfassend ist darauf hinzuweisen, dass wir wesentliche Beiträge zum erfolgreichen Projektabschluss beigetragen haben: Gesamtbericht, On-line Präsentation, Präsenzabschluss und partnerspezifischer Abschlussbericht.

Lösungen für kooperatives Fahren IMAGinE

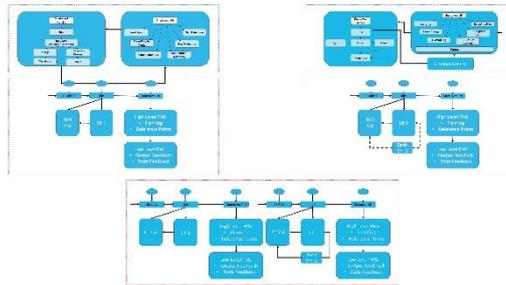
BEITRÄGE MERCEDES-BENZ / DCAITI: ÜBERBLICK

Motivation

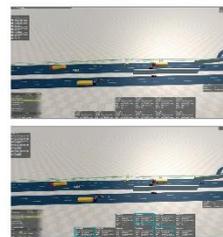


- F1 Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen → Mercedes-Benz
- F2 Kooperative Längsführung auf Autobahnen → DCAITI

Funktionsarchitekturen



Funktion F1: Beispiel



Initiate and Buildup

Platform is realized and drives

Funktion F2: Beispiel



Realisierung in der Simulation



Fazit und Ausblick

- Die Funktionen F1 & F2 konnten in der Simulation in Form von
- Reinen Szenariosimulationen
 - Realdatensätzen (highD, exiD)
 - Interaktion zwischen Fahrzeugen (realen vs. simulierten) entwickelt, dargestellt und evaluiert werden.

Ein Beitrag von Mercedes-Benz / DCAITI
www.imagine-online.de



Abbildung 53: Poster Übersicht F1 & F2

Lösungen für kooperatives Fahren **IMAGinE**

KOOPERATIVES EINFÄDELN AUF AUTOBAHNEN

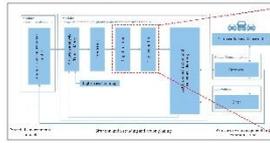
Motivation



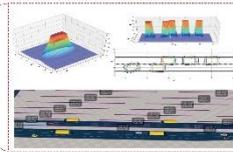
Bereits wenige mit V2X ausgerüstete Fahrzeuge können die Abdeckungsrate des Umfeldmodells signifikant erhöhen

Lateraler Prädiktionsfehler sinkt um ca. 50 % bei Verwendung eines Neuronalen Netzes entgegen VLK-Modell

Situationsanalyse



Lückenhandling



Informationsquellen

Ego-Sensorsicht

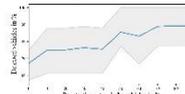


Erweitertes Umfeldmodell



Karte
Sensoren
Umfeldmodell
V2X

Detektierte Objekte mit V2X

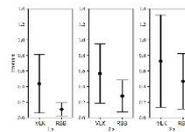


Prädiktion

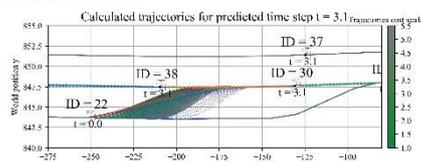


Methoden:
 Velocity and Lane Keeping Modell (VLK) ● VLK Modell
 Neuronales Netzwerk trainiert mit KNFF-Daten (RBB) ● RBB Modell
● Ground Truth

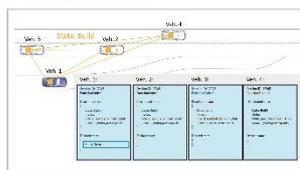
Laterale Prädiktionsfehler



Trajektorienplaner



Manöverabstimmung



Kooperative Session CMM



Ein Beitrag von Mercedes-Benz AG / DCAITI
www.imagine-online.de



Abbildung 54: Poster F1 Kooperatives Einfädeln auf Autobahnen

Lösungen für kooperatives Fahren **IMAGinE**

ANWENDUNG: F2 PLATOONING

Validierung von technischer Machbarkeit, Skalierungsfähigkeit und Wirkungen



Umsetzung des rollenbasierten Protokolls für Platooning

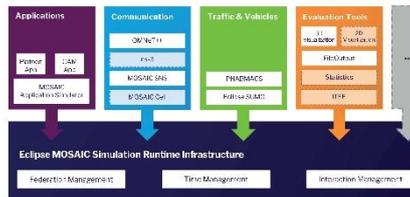


- Verifikationsszenarien:
1. Platoon initial aufbauen mit 3-x Fahrzeugen
 2. Ein Fahrzeug tritt dem Platoon bei, von beiden Enden
 3. Ein Fahrzeug verlässt das Platoon, aus jeder Position
 4. Auflösen des Platoons
 5. Gemeinsames Bremsen / Beschleunigen im Platoon
 6. Störfahrzeug verzögert Aufbau des Platoons
 7. Störfahrzeug verhindert Aufbau des Platoons

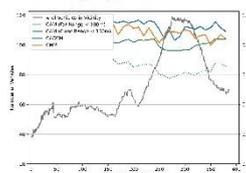
PHABMACS wurde eingesetzt, um die sieben Verifikationsszenarien im submikroskopischen Simulator nachzubilden

Aufbau der gesamten Co-Simulation

MOSAIC koppelt zur Laufzeit PHABMACS für Fahrzeugdynamik, OMNeT++ für Kommunikationsuntersuchung sowie SUMO für den Umgebungsverkehr unter realen Verkehrsbedingungen zur einer ganzheitlichen Co-Simulationsumgebung



Validierungsergebnisse



Hohe Kanallast durch zunehmende Anzahl der Fahrzeuge im Kommunikationsbereich beeinflusst Zustellraten (PDRs) der Platoon-Nachrichten unterkritisch

Funktions- und sicherheitskritische CMMs (Rollen-Protokoll) und CACCMS (Cooperative Adaptive Cruise Control) können in ihrem Relevanzbereich zuverlässig zugestellt werden (PDR > 0.85) → **F2 Platooning rollenbasiert durchgängig möglich**

Bei den CAMs führt die hohe Fahrzeug-Anzahl zu leicht reduzierter PDR, insbesondere für weit entfernte Sender → **etablierte V2X-Funktionen sind weiterhin darstellbar**

Parametrierung der Kommunikation

NACHRICHTENTYP	AUSSTATTUNG	GRÖSSE	FREQUENZ
CAM	Alle Fahrzeuge	350 Bytes	2.5 Hz
CACC	Platoon	50 Bytes	10 Hz
CMM	Platoon	100 Bytes	5 Hz

Ein Beitrag von Mercedes-Benz AG / DCAIT
www.imagine-online.de



Abbildung 55: Poster F2 Platooning

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] 2. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Neue Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „„Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“, 2015“.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Digitale Agenda 2014-2017, 2014“.
- [4] Bundesregierung, „Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, 2002“.
- [5] Eclipse MOSAIC, „ECLIPSE MOSAIC,“ [Online]. Available: <https://www.eclipse.org/mosaic/>.
- [6] omnetpp, „OMNeT++,“ omnetpp, [Online]. Available: <https://omnetpp.org/>.
- [7] O. Sawade and I. Radusch, „Survey and classification of cooperative automated driver assistance systems in 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2015 - Proceedings, 2016“.
- [8] Lucas Eiermann, Florian Wirthmüller , Kay Massow , Gabi Breuel and Ilja Radusch, „„Driver Assistance for Safe and Comfortable On-Ramp Merging Using Environment Models Extended through V2X Communication and Role-Based Behavior Predictions“, in Proceed“.
- [9] Consortium, CAR 2 CAR Communication, „Memorandum of Understanding for OEMs within the CAR 2 CAR Communication Consortium on Deployment Strategy for cooperative ITS in Europe, 2011“.
- [10] Consortium, CAR 2 CAR Communication, „Aktualisierung zum Memorandum of Understanding, 2015“.
- [11] Bundesministerium für Bildung und Forschung , „Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie (HTS-Aktionsplan), 2012“.

1 ANLAGE: KURZFASSUNG

Im Verbundprojekt IMAGinE (Intelligente Manöver Automatisierung – kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit) arbeiteten von September 2016 bis Mai 2022 zwölf Partner aus der 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 einen sicheren und effizienten Verkehrsfluss zu gewährleisten. 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.

2 ANHANG 1: ÜBERSICHT DER DELIVERABLES

ID	Titel	Fertigstellung	Verbreitungsgrad
D1.0	Glossar	Lebendiges Dokument; Ersterstellung: 28.04.2017	Intern
D1.1	Einordnung kooperativer Funktionen	17.05.2017	Öffentlich
D1.2	Use-Case-Analyse	31.07.2017	Öffentlich
D1.3	Harmonisierung der Anforderungen	21.07.2017	Öffentlich
D2.1	Rahmenspezifikation System und Funktionen	28.11.2017	Intern
D2.2	Vorläufige Schnittstellenbeschreibungen	28.07.2021	Intern
D2.3	Proof-of-Concept-Umsetzung	30.11.2021	Intern
D2.4	MMI-Studien und Interaktionskonzept	27.11.2018	Intern
D2.5	Spezifikation kooperativer Manöverplanung und Systemarchitektur <i>Specification of Cooperative Maneuver Coordination and System Architecture</i>	13.04.2022	Öffentlich
D3.1	Spezifikation und Implementierung kooperatives Umfeldmodell	21.06.2021	Öffentlich
D3.2	Spezifikation und Implementierung kooperative Manöverplanung	16.12.2021	Intern
D3.3	Spezifikation und Implementierung Kommunikationsmodule	07.06.2022	Intern
D3.4	Spezifikation und Implementierung Simulationswerkzeuge	13.09.2022	Intern
D3.5	MMI-Studien und erweitertes Interaktionskonzept für Unsicherheitsbedingungen	22.10.2019	Intern
D4.1	Fahrzeugaufbau und Integrationsplan	23.11.2018	Intern
D4.2	Fahrzeuginbetriebnahme IMAGinE-Basissystem	04.03.2020	Intern
D4.3	Fahrzeuginbetriebnahme Umfeldmodell	11.03.2021	Intern

ID	Titel	Fertigstellung	Verbreitungsgrad
D4.4	Fahrzeuginbetriebnahme kooperative Fahrmanöver	19.04.2022	Intern
D5.1	Evaluationskonzept	07.10.2021	Intern
D5.2	Evaluation der Mensch-Maschine-Interaktion	10.01.2022	Intern
D5.3	Evaluation in der Simulation	19.07.2022	Intern
D5.4	Evaluation im Realfahrzeug	19.07.2022	Intern
D5.5	Bewertung der Evaluationsergebnisse	19.07.2022	Intern
D5.6	Projektdemonstration	02.11.2022	Intern
D6.1	Projekthandbuch	09.05.2017	Intern
D6.2	Internetauftritt	Statische Website: 29.11.2016 Dynamische Website: 09.08.2017	Öffentlich
D6.3	Kommunikationsplan	24.08.2017	Intern
D6.4	Gemeinsamer Schlussbericht	30.11.2022	Intern
D6.5	StK-/PMT-Treffen und -Telkos	laufend	Intern

3 ANHANG 2: VERÖFFENTLICHUNGEN

2017

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

2020

Lucas Eiermann , Florian Wirthmüller , Kay Massow , Gabi Breuel and Ilja Radusch: „Driver Assistance for Safe and Comfortable On-Ramp Merging Using Environment Models Extended through V2X Communication and Role-Based Behavior Predictions“, in Proceedings ICCP, Sep. 2020

Lucas Eiermann, Nick Bühler, Dr. Gabi Breuel, Dr. Ilja Radusch, Prof. Hauswirth: „Trajectory Based Motion Planning for On-Ramp Merging-Situations Considering Extended - Evaluation Criteria“, in Proceedings ICCP, Sep. 2020

Lucas Eiermann, Oliver Sawade, Sebastian Bunk, Gabi Breuel and Ilja Radusch: „Cooperative automated lane merge with role-based negotiation“, in Proceedings IV, May 2020

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)] Dr. Breuel Gabi	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2022
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Mercedes-Benz AG, 70546 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen Mercedes-Benz 19A16003I
	11. Seitenzahl 88
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 11
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 55
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 wurden die Erforschung der Grundlagen kooperative 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 interagierende 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	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Breuel Gabi	5. end of project 31.05.2022
	6. publication date
	7. form of publication Document
8. performing organization(s) (name, address) Mercedes-Benz AG, 70546 Stuttgart	9. originator's report no.
	10. reference no. Mercedes-Benz 19A16003I
	11. no. of pages 88
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 11
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 55
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