



IMAGinE

Deliverable D2.5

Spezifikation kooperativer Manöverplanung und Systemarchitektur

Version:	V1.0
Editor:	Volkswagen AG
Projektkoordination:	Opel Automobile GmbH
Fälligkeitsdatum:	31.03.2022
Erstellungsdatum	06.04.2022
Veröffentlichung:	13.04.2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DOKUMENTENINFORMATION

AUTOREN

Dr. Lutz Bürkle, Bosch

Lucas Dahlbock, MB

Albrecht Dill, BMW

Maxim Dolgov, Bosch

Monique Engel, VW

Dr. Hendrik Fuchs, Bosch

Dr. Stefan Gläser, VW

Thomas Grotendorst, Continental

Jürgen Hauenstein, MAN

Viktor Lizenberg, Opel

Ignacio Llatser Martí, Bosch

Jan Cedric Mertens, MAN

Katharina Nagel, AdB

Torben Schenkel, AdB

Matthias Schid, Nordsys

Martin Sevenich, Continental

Dr. Dieter Schuller, Opel

Dr. Sebastian Strunck, Continental

Michael Wenig, VW

Dr. Peter Zahn, BMW

REVIEWER

Dr. Stefan Gläser, Volkswagen AG

Katharina, Nagel, Die Autobahn GmbH des Bundes

Dr. Sebastian Strunck, Continental Teves AG & Co. oHG

KONTAKT

Monique Engel

SDS Base Service

Self-Driving System Development (ND-SD)

Volkswagen AG

38436 Wolfsburg

Tel.: +49 (0) 5361-9-991537

E-Mail: monique.engel@volkswagen.de

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung	1
2 Technischer Rahmen	2
2.1 Allgemeine IMAGinE-Architektur	2
2.2 Kooperatives Umfeldmodell	3
2.3 Visualisierung	7
2.4 Kommunikationsmodul	7
3 Beschreibung der Konzepte zur kooperativen Manöverabstimmung	10
3.1 Übersicht der partnerspezifischen Verfahren zur Untersuchung der Aspekte von Manöverkoordinierung	10
3.2 Kooperationskonzept IMAGinE 2018	15
3.2.1 Grundkonzept	15
3.2.2 Abstimmungskonzept	20
3.3 Konzeptvorstellung Volkswagen	21
3.3.1 Annahmen und Voraussetzungen	21
3.3.2 Trajektorien	22
3.3.3 Kostenfunktion	23
3.3.4 Resultierendes Abstimmungskonzept	24
3.3.5 Funktionsweise des Kooperativen Manöverplaners	24
3.4 Konzeptvorstellung OPEL	28
3.4.1 OpelCore 2018/19	28
3.4.2 Weitere Verfahren	31
3.5 Konzeptvorstellung BMW	33
3.5.1 Manöverabstimmungskonzept „Bbasic“	33
3.5.2 Manöverabstimmungskonzept „BBB“	34
3.6 Konzeptvorstellung Mercedes-Benz AG/DCAITI	34
3.7 Konzeptvorstellung MAN – Kooperative Längsführung (F2)	36
3.7.1 Motivation	36
3.7.2 Konzept	36
3.7.3 Quellen	40
3.8 Konzeptvorstellung MAN – Kooperative Lkw-Überholmanöver	41
3.8.1 Motivation	41
3.8.2 Ausgangssituation	42
3.8.3 Optimierungsansatz	42
3.8.4 Manöverplanung	44

3.8.5 Manöverabstimmung	44
3.9 Konzeptvorstellung Autobahn GmbH	46
3.9.1 Motivation	47
3.9.2 Konzept	47
4 Ergebnisse aus der Konzeptverifikation	53
4.1 Konzeptverifikation Continental	53
4.1.1 Ablauf einer Kooperation am Beispiel eines Linksabbiegerszenarios mit dem implementierten Manöverplaner	54
4.1.2 Einbeziehung des Fahrers oder einer höheren Entscheidungsinstanz	58
4.1.3 Gleichzeitige Kooperation mit zwei Partnern	62
4.1.4 Erkennung der Kooperativität anderer Teilnehmer / Auswirkung schlechter Bedarfstrajektorien	65
4.1.5 Störungen	67
4.1.6 Verschachtelte Kooperationen am Beispiel Autobahnauffahrt	71
4.1.7 Langer vs. kurzer Planungshorizont / Abstimmungsvorlauf	76
4.1.8 Erzwungene Kooperation / Unterschiedliches Situationsverständnis	78
4.1.9 Kooperationsbereiche für ausgewählte Szenarien	79
4.1.10 Auswirkung / Nutzen einer Kooperation für das Gesamtsystem aller Fahrzeuge	81
4.1.11 Herausforderung: Gleichzeitige Kooperation vieler Fahrzeuge	81
4.2 Konzeptverifikation Bosch	82
4.3 Konzeptverifikation Volkswagen	87
4.3.1 Verifikation Funktion F1 und Kooperativer Manöverplaner	87
4.3.2 Verifikation Funktion F3 und Kooperatives Umfeldmodell	102
4.4 Konzeptverifikation OPEL	113
4.4.1 Metriken und Szenarien	113
4.4.2 Ergebnisse	115
4.5 Ergebnisse Konzeptverifikation (BMW)	120
4.5.1 Verifikation GUA1 Konzept "IMAGinE 2018"	120
4.5.2 Verifikation Bbasic Konzept	122
4.5.3 Zusammenfassung der vorliegenden Ergebnisse	132
4.6 Konzeptverifikation Mercedes-Benz AG/DCAIT	132
4.6.1 F1 Proof of Concept	132
4.6.2 F2 Proof of Concept	135
4.7 Konzeptverifikation Autobahn GmbH	137
4.7.1 F4 Funktionsvalidierung im Fahrzeug	137
4.7.2 F4 Verkehrliche Wirkung	137

5 Zusammenfassung und Ausblick

140

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Systemarchitektur des IMAGinE-Systems.....	2
Abbildung 2:	Systemarchitektur kooperatives Umfeldmodell.....	4
Abbildung 3:	Darstellung des Datenbank-Management-Systems	6
Abbildung 4:	IMAGinE Umfeld-Visualisierung.....	7
Abbildung 5:	Das bevorrechtigte Fahrzeug A bietet Alternativtrajektorien an. Das nachrangige Fahrzeug B sendet Bedarfstrajektorien. Die Bezugstrajektorien sind kollisionsfrei.	18
Abbildung 6:	Konzept von Volkswagen zur Manöverabstimmung basierend auf dem Austausch von Plan-Trajektorien (grün) und Wunsch-Trajektorien (gelb)	21
Abbildung 7:	Plan-Trajektorie ist nicht mehr erlaubt, da nicht mehr kollisionsfrei. Es muss stattdessen eine kollisionsfreie Lösung gefunden werden.....	22
Abbildung 8:	Wunsch-Trajektorie (gelb) als Reaktion auf die ungültigen, weil nicht mehr konfliktfreien Plan-Trajektorien. Der Grund ist, dass eine Anpassung der Plan-Trajektorie eine Steigerung der Kosten zur Folge hätte; Die Wunsch-Trajektorie würde eine kostengünstigere Alternative darstellen (wenn sie akzeptiert würde).....	23
Abbildung 9:	Darstellung eines Planungszyklus für V01 und V02, in welchem keine Kollisionen mit Plan- und Wunsch-Trajektorien des jeweils anderen Fahrzeuges vorliegen.	25
Abbildung 10:	Darstellung eines Planungszyklus an der Einfädelspur aus Sicht von V01.	26
Abbildung 11:	Darstellung eines Planungszyklus mit eingehender Wunsch-Trajektorie von V01 aus Sicht des Planers von V02.....	27
Abbildung 12:	Darstellung eines Planungszyklus aus Sicht von V01, abhängig davon ob V02 im Planungszyklus t3 den Kooperationswunsch von V01 akzeptiert (links) oder abgelehnt (rechts) hat.	28
Abbildung 13:	Darstellung der Plan-Trajektorie von V01 und V02 zu einem späteren Zeitpunkt, abhängig davon ob V02 im Laufe des Einfädelvorgangs einen Kooperationswunsch von V01 akzeptiert (links) oder kontinuierlich alle eingehenden Wunsch-Trajektorien abgelehnt (rechts).....	28
Abbildung 14:	Konzept der kooperativen Manöverabstimmung – OpelCore 2018/19 [1]....	30
Abbildung 15:	Konzept der kooperativen Manöverabstimmung – AltTraj 2018.....	31
Abbildung 16:	Konzept der kooperativen Manöverabstimmung – Targets 2019.....	32
Abbildung 17:	Zustandsautomat Funktion F2	34
Abbildung 18:	Rollenbasiertes Konzept im Platoon-State „Beitreten“	35
Abbildung 19:	Vereinfachte Komponentenübersicht der kooperativen Längsführung für Nutzfahrzeuge.....	38
Abbildung 20:	Elefantenrennen blockiert die Überholspur	42

Abbildung 21:	Ausgangssituation für das Lkw Überholmanöver	42
Abbildung 22:	Drei Ansätze für die Optimierung der kooperativen Lkw-Überholmanöver ..	43
Abbildung 23:	Verteilter Zustandsautomat für das kooperative Lkw-Überholmanöver	45
Abbildung 24:	Beschreibung des Generischen Teils der IDSM.....	46
Abbildung 25:	Beschreibung des funktionsspezifischen Teils der IDSM	46
Abbildung 26:	Situation in Funktion F4: Entscheidungspunkt. (Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)	47
Abbildung 27:	Fahrerseitige Routenkriterien.....	48
Abbildung 28:	Nachrichtenübertragung zwischen Fahrzeugen, IRS und SUPS	49
Abbildung 29:	Struktur des Nachrichtenformates ITD	51
Abbildung 30:	Abstimmungsbereich	51
Abbildung 31:	Bild des Szenarios F5.3b: Linksabbieger auf Landstraßen	54
Abbildung 32:	Messung F5_Scenario3b_V02_Accept_without_Drv_2021-11-11-14-53- 20_ok.bag resultierend aus CarMaker Simualtion von F5-Scenraio 3b, Testrun "V02 AcceptWithoutDrv".....	56
Abbildung 33:	Geschwindigkeitsverlauf der Trajektorien zum Zeitpunkt t=10.9s.....	57
Abbildung 34:	Geschwindigkeitsverlauf der Trajektorien zum Zeitpunkt t=14.0s.....	58
Abbildung 35:	Trajektorien zum Zeitpunkt t=13.7s.....	59
Abbildung 36:	Messung F5_Scenario3b_V02_Accept_by_Drv_2021-11-11-15-12-08_ok.bag resultierend aus CarMaker Simulation von F5-Scenraio 3b, Testrun "V02 AcceptByDrv"	61
Abbildung 37:	Bild des Szenarios F5.3: Linksabbieger auf Landstraßen, zwei Fahrzeuge von rechts und links	62
Abbildung 38:	Messung F5_Scenario3_2021-11-09-19-35-32_both_same_ok.bag vs. F5_Scenario3_2021-11-09-19-33-46_both_same_nok_noOffer.bag; resultierend aus CarMaker-Simulation von F5-Scenario 3, Testrun "Both same"	63
Abbildung 39:	Messung F5_Scenario3_2021-10-27-16-39-46.bag; F5-Scenario 3	64
Abbildung 40:	Messung F5_Scenario3_2021-10-27-20-43-46_second_aborts.bag, basierend auf CarMaker-Szenario F5-Scenario3.....	65
Abbildung 41:	Messung F5_Scenario3b_V02_AcceptByDrv_ok_2021-11-15-16-10-47.bag vs. F5_Scenario3b_V02_AcceptByDrvNoMeta_ok_2021-11-15-16-12-30.bag; F5- Scenario 3b, Testrun "V02 AcceptByDrv"	66
Abbildung 42:	Messung F5_Scenario3b_V02_AcceptByDrvAcc_2021-11-18-11-34- 26_acc.bag; F5-Scenario 3b, Testrun "V02 AcceptByDrvAcc"	68
Abbildung 43:	Messung F5_Scenario3b_V03_manualBrake_2021-11-16-18-35-35.bag; F5-Scenario 3b, Testrun "V02 AcceptByDrv"	70
Abbildung 44:	Trajektorienverläufe für drei ausgewählte Zeitpunkte.....	71
Abbildung 45:	Szenario F1 Autobahnauffahrt.....	72

Abbildung 46:	Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-15-42-17_vier.bag, Testrun "Standstill"	74
Abbildung 47:	Ausschnitt aus Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-15-42-17_vier.bag, Testrun "Standstill"	75
Abbildung 48:	Verkürzte Vorschauzeit. Kooperation schlägt fehl. Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-19-15-28_short_fail.bag	76
Abbildung 49:	Geschwindigkeitsverlauf "fast erzwungene Kooperation" Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-20-06-54_short_forced.bag ...	77
Abbildung 50:	Time-to-collision für das Szenario.....	78
Abbildung 51:	Messung "erzwungene Kooperation" F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-21-17-19-27_forced.bag	79
Abbildung 52:	Geschwindigkeitsverlauf bei maximal akzeptierten Kosten für den Gewährnden bei kreuzendem Verkehr	80
Abbildung 53:	Geschwindigkeitsverlauf bei maximal akzeptierten Kosten für den Gewährnden bei Verkehr in gleicher Richtung	81
Abbildung 54:	Visualisierung der berechneten kollisionsfreien Trajektorien (Linien), der ausgewählten Referenztrajektorien (Kreuze) und Bedarfstrajektorien (Kreise) sowie deren Kosten.	84
Abbildung 55:	Reference trajectory ratio und request trajectory ratio in Abhängigkeit von velocity_step	85
Abbildung 56:	Durchschnittskosten der Referenz- und Bedarfstrajektorien in Abhängigkeit vom Trajektoriendauer	86
Abbildung 57:	Kosten der Referenz- und Bedarfstrajektorien in Zeitablauf in Abhängigkeit vom Schwellenwert für die Auswahl der Bedarfstrajektorien.....	87
Abbildung 58:	Für die Verifikation verwendete Einfädelsituation mit den kooperativ-ausgerüsteten Fahrzeugen V01 und V02. Um die Kosten für ein Abbremsen auf der Einfädelspur zu variieren, startet V01 je nach Szenario etwas vor oder hinter V02.	88
Abbildung 59:	Lokale Koordinaten relativ zur Straße der Trajektorien von V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 1.	93
Abbildung 60:	Ergebnisse der kooperativen Manöverabstimmung zwischen V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 1. Es ist zu erkennen, dass, wie erwartet, keine Wunschtrajektorien versendet wurden.	93
Abbildung 61:	Lokale Koordinaten relativ zur Straße der Trajektorien von V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 2	97
Abbildung 62:	Ergebnisse der kooperativen Manöverabstimmung zwischen V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 2	97
Abbildung 63:	Lokale Koordinaten relativ zur Straße der Trajektorien von V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 3	101

Abbildung 64:	Ergebnisse der kooperativen Manöverabstimmung zwischen V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 3	101
Abbildung 65:	Funktionsweise der Kollektiven Überholwarnung.....	102
Abbildung 66:	Realisierung der Funktion F3 zum kooperativen Überholen auf Landstraßen im Simulator	103
Abbildung 67:	Szenario für die Untersuchung der Prädiktion in Kurvenfahrten	105
Abbildung 68:	Basisszenario ohne eingebrachte Störeffekte; Ego durchfährt hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug die Kurven. Das Ego-Fahrzeug ist dabei grün dargestellt, blau sind die von der fahrzeugeigenen Sensorik detektierten Objektpositionen, "orange" die CPMs und "gelb" (in diesem Snapshot gerade nicht zu sehen) die CAMs. In türkis sind die Ergebnisse der Objektfusionen dargestellt.	106
Abbildung 69:	Ein konstanter Offset in der fahrzeugeigenen Sensorik führt zum Versatz (blau)gegenüber der vom Fahrzeug selbst übermittelten Position (gelb) sowie der vom Kommunikationspartner wahrgenommenen und kommunizierten Position (orange) des Ego-Fahrzeugs (grün). Das Ergebnis der Sensordatenfusion zeigt dadurch ebenfalls einen Versatz (türkis).	107
Abbildung 70:	Fälschlich erzeugtes Objekt (türkis, unten links) aufgrund empfangener CPM, welche eine Objektposition enthält, die sich nicht mit der Ego-Position vereinbaren lässt.....	107
Abbildung 71:	Zusätzlich aufgemachte Tracks durch zu große Positionsfehler für die gewählte Gate-Größe.....	108
Abbildung 72:	Driften eines Objektes, hier aufgrund eines nicht mehr aktualisierten Tracks	109
Abbildung 73:	Kurvenfahrt mit konstantem Offset und ohne Gierrate-Information; Die Visualisierung zeigt, dass der Offset als Artefakt zu einem zusätzlichen Track des Ego-Fahrzeugs führt.....	110
Abbildung 74:	Kurvenfahrt mit hohem konstanten Offset und hoher Streuung der Position und hoher Varianz auf der fahrzeugeigenen Sensorik.....	111
Abbildung 75:	Szenario für die Untersuchung der Skalierbarkeit.....	112
Abbildung 76:	Basisszenario zur Skalierbarkeit.....	112
Abbildung 77:	Abbiegen in einer Kreuzung bei hoher Fahrzeugdichte und konstant versetztem Fahrzeugsignalen. Die Zuordnung zu den tatsächlich vorhandenen Fahrzeugen ist immer noch möglich, weil die orangen Blöcke aufgrund der in der Simulation verwendeten geringen Aktualisierungsrate von 1.000 ms nicht realitätsgemäß verschlechtern.	113
Abbildung 78:	Übersicht der Metriken der Verkehrsqualität, angewandt auf eine generische Autobahnauffahrt (Funktion F1) [1]	114

Abbildung 79:	Ergebnis – Verkehrsdichte, -geschwindigkeit und -stärke im Zeitbereich [1]	116
Abbildung 80:	Ergebnis – Verkehrsdichte, -geschwindigkeit und -stärke als Fundamentaldiagramm [1]	117
Abbildung 81:	Ergebnis – CV über Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge [1]	118
Abbildung 82:	Ergebnis – Anzahl der Fahrzeuge mit entsprechenden TETTC [1]	119
Abbildung 83:	Ergebnis – raumzeitliche Muster [1]	120
Abbildung 84:	3s: Kooperationszusage nach Anfrage mit Wechseltrajektorie	124
Abbildung 85:	7s: Einscheren nach Kooperation	124
Abbildung 86:	7s: Einscheren nach Kooperation auf Anfrage mit Intention	125
Abbildung 87:	Früherer Fahrstreifenwechsel durch IMAGinE-Kooperation	126
Abbildung 88:	Ausgeglichenes Beschleunigungsprofil	126
Abbildung 89:	Geringer kurzzeitiger Geschwindigkeitsverzicht	127
Abbildung 90:	Abstandshaltung kooperativer Fahrstreifenwechsel	127
Abbildung 91:	Sichere Zeitlücke	128
Abbildung 92:	5s: Erster Grant an vordersten Einscherer	129
Abbildung 93:	8s: Zweiter Grant an zweiten Einscherer	129
Abbildung 94:	Parallel geplante und durchgeführte Fahrstreifenwechsel	130
Abbildung 95:	11s: 3. Grant an dritten Einscherer durch zwei Fahrzeuge	130
Abbildung 96:	15s: Einscheren in enge Lücke nach Abstimmung	131
Abbildung 97:	20s: Vergrößerung der Abstände, Auflösung durch weitere Fahrstreifenwechsel	131
Abbildung 98:	PHABMACS-Simulation Szenario Einfädeln	133
Abbildung 99:	State-Zustände der Teilnehmer in der Simulation	133
Abbildung 100:	Geschwindigkeitsdiagramm ohne Kooperation	134
Abbildung 101:	Geschwindigkeitsdiagramm mit Kooperation	135
Abbildung 102:	Platooning wird gebildet	135
Abbildung 103:	Platooning ist aktiv – Fahrzeuge mit gleichem Abstand	136
Abbildung 104:	Geschwindigkeit und Distanz-Messung im Szenario Platooning	136

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bedeutung
AQ	Accuracy Quantization
CAM	Cooperative Awareness Message
CMC	Cooperative Maneuver Coordination
CMP	Collaborative Maneuver Protocol
COM	Kommunikationsmodul
CPM	Collective Perception Message
CTRA	Linearized Constant Turn Rate and Acceleration
EKF	Erweiterter Kalman-Filter
FGW	Framework2Framework-Gateway
GNSS	Global Navigation Satellite System
GUA	Gemeinsamer Unterauftrag
HMI	Human Machine Interface
IDMS	IMAGinE Driving Strategy Message
IRS	Intelligent Roadside Station
ITDM	IMAGinE Traffic Distribution Message
KOP	Kooperative Manöverplanung und -abstimmung
MCM	Maneuver Coordination Message
MPT	Most Probable Trajectory
RDBMS	Relationales Datenbank Management System
RoI	Region of Interest
ROS	Robot Operating System
StVO	Straßenverkehrsordnung
SUPS	Support Server
TETTC	Time-Exposed Time-to-Collision
TTC	Time-to-collision
UMF	Kooperatives Umfeldmodell

1 EINLEITUNG

Im öffentlichen Straßenverkehr ist häufig zu beobachten, wie Verkehrsteilnehmer miteinander kooperieren. Zum Beispiel gewährt ein Autofahrer einem anderen die Vorfahrt, indem er dies durch eine Handbewegung signalisiert. Diese Art der Kooperation beruht häufig auf einem von zwei Gründen. Entweder ist es nicht eindeutig geregelt, wie sich die Verkehrsteilnehmer in der aktuellen Situation verhalten sollen und sie vermeiden durch die Kooperation proaktiv kritische oder ineffiziente Situationen, oder die entsprechende Regelung für die Situation führt dazu, dass ein Verkehrsteilnehmer handlungsunfähig wird, solange sich kein anderer Verkehrsteilnehmer kooperativ verhält.

Eine besondere Herausforderung stellt diese unpräzise Regelung für das automatisierte Fahren dar. Für das automatisierte Fahren ist es nötig, die Straßenverkehrsregeln als eine exakte algorithmische Beschreibung zu formulieren. Da diese Regeln unterschiedlich interpretiert werden können, kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle automatisiert fahrenden Fahrzeuge sich gleich verhalten werden. Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass es immer Fahrzeuge geben wird, die nicht automatisiert fahren werden. Daher ist es notwendig, dass automatisiert fahrende Fahrzeuge in Zukunft kooperatives Verhalten zeigen und ihre Manöver mit anderen Fahrzeugen koordinieren.

Im Rahmen von IMAGinE wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, die Kooperation zwischen Fahrzeugen ermöglichen. Diese Konzepte können für die Koordination von Manövern zwischen beliebigen Fahrzeugen genutzt werden. Dabei wird kein bestimmter Automatisierungsgrad der Fahrzeuge vorausgesetzt. Das heißt, sie erlauben auch die Manöverkoordination zwischen automatisierten, teilautomatisierten und manuell geführten Fahrzeugen.

In diesem Deliverable D2.5 werden mehrere Manöverabstimmungskonzepte zusätzlich zu dem in D2.1 definierten und im GUA1 gemeinsam beauftragten Verfahren beschrieben. Jeder Partner hat sich auf eines der Konzepte zur Manöverabstimmung fokussiert. Gegenüber GUA1 alternative, ergänzende oder erweiterte Verfahren wurden sowohl in der Literatur als auch innerhalb von IMAGinE in einem „Addendum“ zur GUA1-Ausschreibung und weiteren Dokumenten beschrieben. Die IMAGinE-Systemschnittstellen wurden daher so gestaltet, dass sie den erforderlichen Datenaustausch aller in IMAGinE benannten Verfahren abdecken und auch für künftige Verfahren grundsätzlich erweiterbar sind. In D2.5 werden die grundsätzlichen Konzepte beschrieben. Die Basisimplementierungen der einzelnen Manöverplaner und Abstimmungskonzepte wurden in einer Simulationsumgebung in einer Reihe von Testszenarien für mehrere kooperative IMAGinE-Funktionen verifiziert (Proof-of-Concept-Verifikation). Zudem werden die gemeinsamen Komponenten der IMAGinE-Architektur als Gesamtsystem dargestellt und notwendige Anpassungen, welche sich als Ergebnis aus der Simulation ergeben, aufgezeigt.

2 TECHNISCHER RAHMEN

2.1 Allgemeine IMAGinE-Architektur

Für die komplexe Aufgabe von IMAGinE, bei der partnerübergreifend kooperativ abgestimmt und automatisiert gefahren wird, haben sich die IMAGinE Partner auf einige Gemeinsamkeiten in den Versuchssystemen verständigt, um die Komplexität zu reduzieren. Dafür wurde eine Referenzarchitektur definiert, die einen partnerspezifischen Anteil, aber auch einen gemeinsamen (kooperativen) Anteil beinhaltet. Die gemeinsame Referenzarchitektur ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

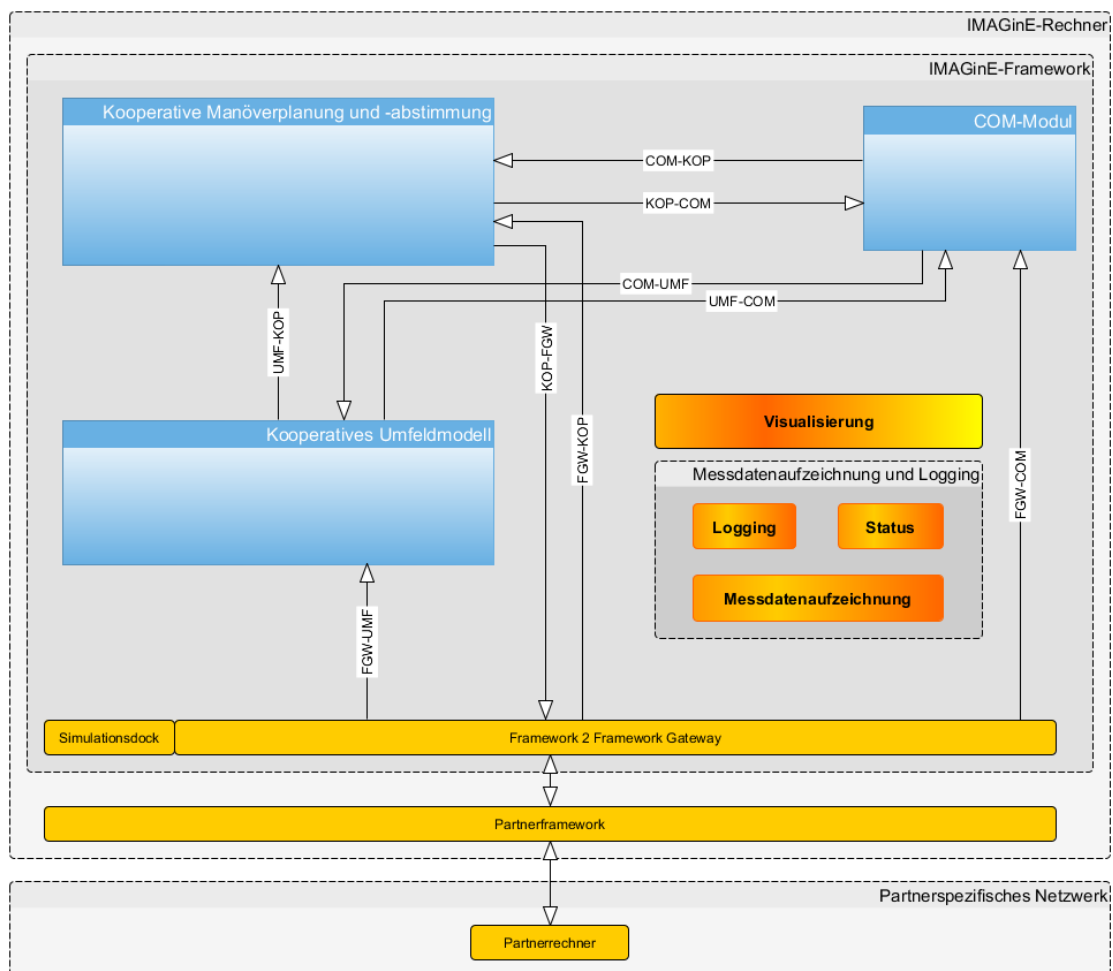


Abbildung 1: Systemarchitektur des IMAGinE-Systems

Die Anbindung an das Partnersystem erfolgt über ein Framework2Framework-Gateway, welches von jedem Partner in Eigenregie erstellt wurde, um die eigenen Systeme an die kooperativen IMAGinE-Systeme anzubinden. Die einzelnen kooperativen Komponenten können entweder durch partnereigene Implementierungen erfolgen oder als gemeinsam implementierte Soft-

ware in den partnerspezifischen Simulationsumgebungen eingebunden werden. Für diese Lösungen waren jedoch die Partner selbst verantwortlich und trugen Sorge dafür, dass die gemeinsamen Schnittstellen richtig bedient werden, sowohl innerhalb des eigenen Fahrzeugs und, viel wichtiger noch, bei der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation.

Die Module "Kooperatives Umfeldmodell" und "Kooperative Manöverplanung und -abstimmung" sind in gemeinsamen Unteraufträgen entstandene Softwaremodule. Um die verschiedenen Aspekte der kooperativen Manöverabstimmung von möglichst vielen Seiten zu beleuchten haben sich im Laufe des Projekts unterschiedliche Arten der Manöverabstimmung herausgebildet, die von unterschiedlichen Partnern eingebracht worden sind. Dadurch kommt es bei den unterschiedlichen Partnern zu Abweichungen von der Referenzarchitektur. Die Verfahren zur Untersuchung der verschiedenen Aspekte zur Manöverabstimmung werden im Kapitel "Beschreibung Konzept der IMAGinE kooperativen Manöverabstimmung" beschrieben.

2.2 Kooperatives Umfeldmodell

IMAGinE erforscht die Realisierung von kooperativen Funktionen. Hierfür wurde im Fahrzeug das Modul „Kooperative Manöverplanung und -abstimmung“ (KOP) entwickelt und getestet. Die Funktionen wie Einfädeln, Abbiegen usw. planen Trajektorien, so dass eine Kooperation aller notwendigen Fahrzeuge erfolgen kann. Um diese Trajektorien zu planen, sind Informationen über Objekte in der Umgebung notwendig. In IMAGinE werden diese Objekte in einem Umfeldmodell gespeichert. Die Informationen, die in diesem Umfeldmodell enthalten sind, können aus mehreren Quellen, wie z. B. Onboard-Sensoren sowie aus der V2X-Kommunikation stammen. Dies wird kollektive Perzeption genannt. In IMAGinE wird diese V2X-Schnittstelle das Kommunikationsmodul (COM) genannt. Nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau des IMAGinE-Rechners sowie die entwickelten Module.

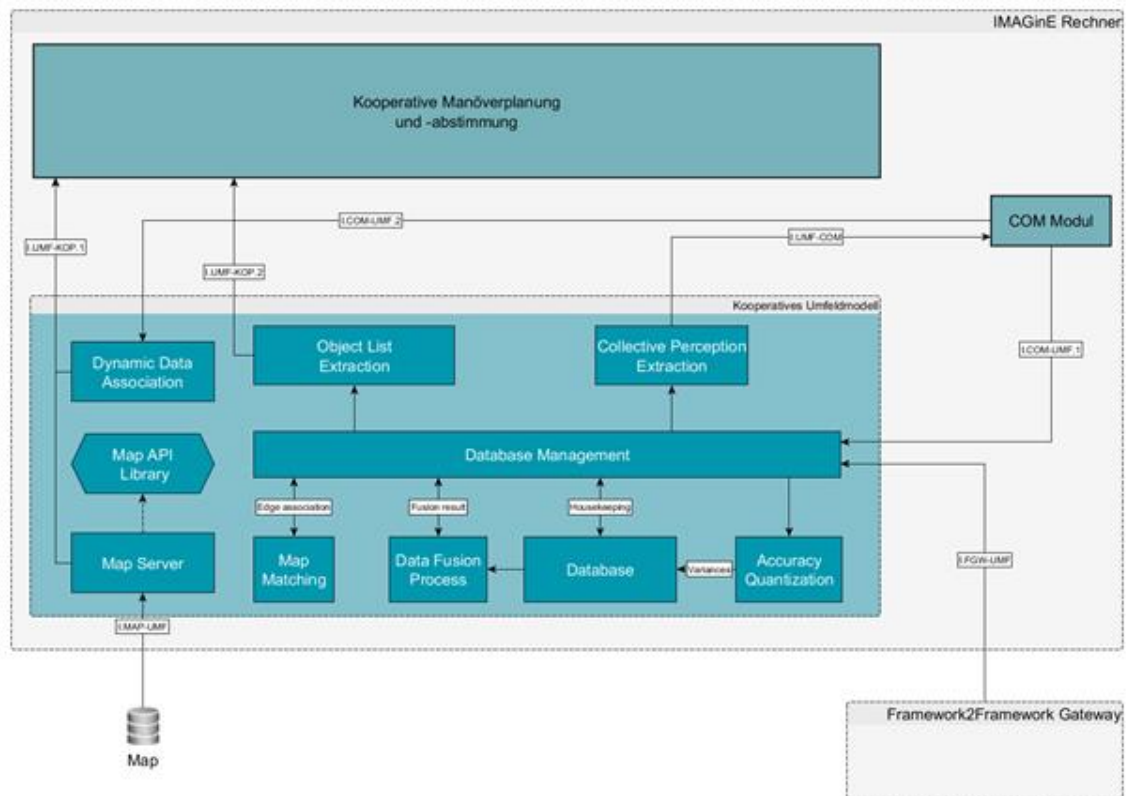


Abbildung 2: Systemarchitektur kooperatives Umfeldmodell

Das Modul "Kooperatives Umfeldmodell" (UMF) bildet hierbei die Informationsgrundlage für das KOP-Modul. Hierfür wurden zwei Schnittstellen definiert, UMF-KOP.1 und UMF-KOP.2.

Das UMF-Modul verwendet u.a. Informationen aus den CPM und CAM, die es von anderen Fahrzeugen über das COM erhält und mit dem es über die Schnittstellen UMF-COM und COM-UMF kommuniziert. Zudem erhält es Nachrichten aus dem partnerspezifischen System über die Schnittstelle FGW-UMF.

Das Konzept des Kooperativen Umfeldmodells basiert auf dem so genannten Objektlistenfusions-Ansatz. Dieser fusioniert die lokale Objektliste mit den V2X-Objekten zu einer globalen Objektliste. Die lokale Objektliste ist das Ergebnis der partnerspezifischen Datenfusion der fahrzeugeigenen Sensorobjekte.

Objektlistenfusions-Ansatz

Jedes kooperative Fahrzeug sendet über die V2X-Schnittstelle mittels der CAM und CPM Informationen über sich und seine detektierten, umliegenden Fahrzeuge. Die Nachrichten werden vom COM-Modul empfangen und dem UMF bereitgestellt. Die Informationen liegen hier bereits fusioniert als Objektliste in den Nachrichten vor. Die Objektlisten werden mit allen anderen empfangenen sowie selbst erfassten Objekten zu einer globalen Objektliste konsolidiert. Wenn also keine V2X-Fahrzeuge in Sendereichweite sind und somit keine V2X-Nachrichten empfangen werden, ist die lokale und globale Objektliste des UMF genau identisch.

Wird eine V2X-Nachricht empfangen, so werden die darin enthaltenen Informationen dazu genutzt, um die Informationen des Kooperativen Umfeldmodells zu verbessern oder zu erweitern. So werden beispielsweise Informationen zu den vom Umfeldmodell verwalteten Objekten durch neu eingehende Informationen aktualisiert oder sogar präzisiert sowie gegebenenfalls neue Objekte hinzugefügt oder nicht mehr vorhandene Objekte entfernt.

Für die Fusion und die Bereitstellung der globalen Objektliste ist es außerdem notwendig, dass das Umfeldmodell die Koordinaten transformiert und relativ zum definierten Referenzpunkt des Ego-Fahrzeugs darstellt. Der Referenzpunkt für das Ego-Koordinatensystem ist bei IMAGinE-Fahrzeugen die Mitte der vorderen Stoßstange (FMID).

Datenfusion

Das Umfeldmodell fusioniert alle Informationen. Dabei werden die Daten von verschiedenen Fahrzeugsensoren und aus V2X genutzt und in einer gemeinsamen (globalen) Objektliste zusammengeführt. Die Sensordaten werden dazu den Objekten zugeordnet, die Gesamtheit der Sensordaten eines Objektes wird als Track bezeichnet.

In jedem Schritt muss dabei für alle Objektinformationen aus den Quellen geprüft werden, ob diese neue Informationen bekannten Objekten zugeordnet werden können oder ein neues Objekt erstellt werden muss. Dies geschieht durch das so genannte Gating. In der anschließenden Assoziation wird eine eindeutige Zuordnung der Messwerte zu den Objekten erreicht.

Um die Varianz der Messdaten möglichst klein zu halten, wird ein Extended Kalman-Filter genutzt. Für den Objektzustand des Extended Kalman-Filters werden Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Gierwinkel und Gierwinkelrate beachtet. Die Prädiktion des Objektzustands erfolgt über das Constant-Turn/Constant-Velocity-Modell. Für die Fusion der Messdaten aus verschiedenen Quellen müssen diese zudem noch auf den gleichen Zeitpunkt prädiziert bzw. ret-rodiziert werden.

Für die Fusion ist es notwendig, dass die Sensormessungen vergleichbar sind. Dafür müssen die Unsicherheiten der Messungen in einem einheitlichen Format verwendet werden. Da die Hersteller der Sensoren die Unsicherheiten nicht bekannt geben möchten, wird eine Quantisierung der Kovarianzen der Sensoren vorgenommen. Diese Normierung der Kovarianzen wird in der Komponente "Accuracy Quantization" (AQ) vorgenommen.

Datenhaltung

Das Umfeldmodell muss Objektdaten für die Manöverplanung und die kollektive Perzeption vorhalten. Dafür werden die Datenstrukturen im Arbeitsspeicher des jeweiligen Rechners vorgehalten, was gegenüber der Speicherung in einem Relationalen Datenbank Management System (RDBMS) mit Persistenz-Mechanismen in der Regel Vorteile in der Performanz bringt. Zur Datenhaltung gehört eine Datenverwaltung einschließlich eines Housekeeping-Prozess. Dieser hat die Aufgabe, die Objektdaten zu aktualisieren, neu anzulegen oder bei Bedarf zu entfernen.

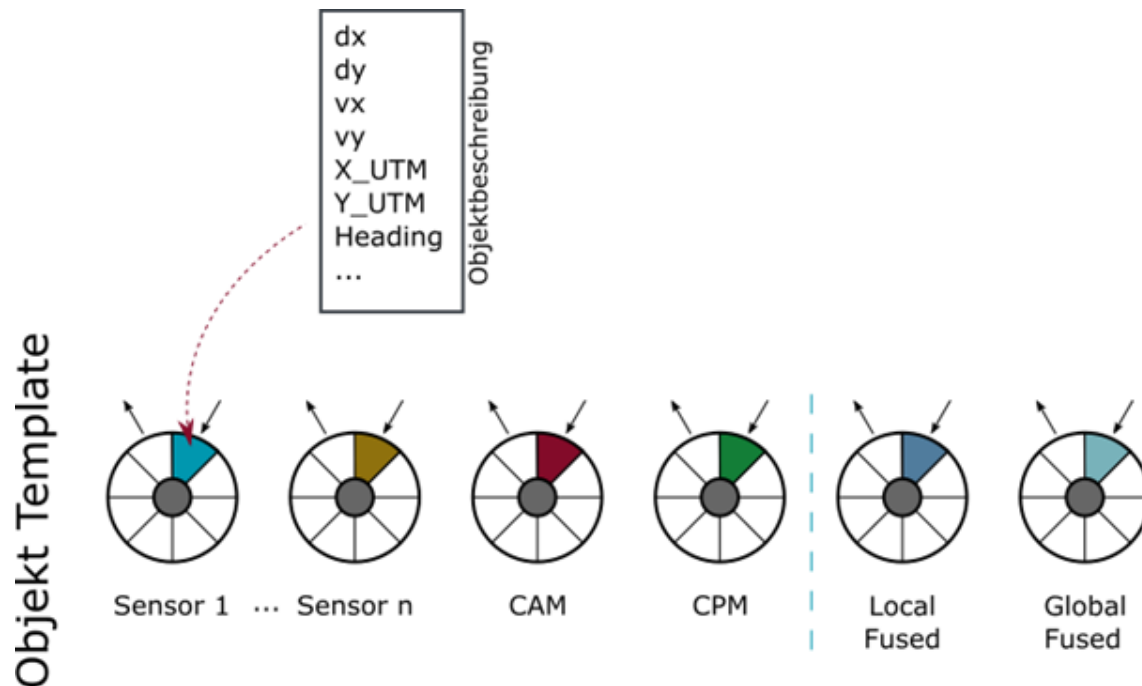


Abbildung 3: Darstellung des Datenbank-Management-Systems

Es wird für jedes der Objekte nicht nur der aktuelle Objektzustand gespeichert, sondern auch die Informationen aus den Eingangsquellen, d.h. Sensoren oder CAM- bzw. CPM-Nachrichten. Außerdem gibt es jeweils eine Speicherung des lokal und des global fusionierten Zustands. Im lokal fusionierten Zustand sind die Werte aus V2X-Nachrichten nicht enthalten. Die Nutzung der V2X-Nachrichten zur Erweiterung des Umfeldmodells wird als Kollektive Perzeption bezeichnet. Um eine bessere Auswertung zu ermöglichen, werden die Daten in einem Ringspeicher abgelegt.

Map-Matching

Für die Manöverplanung ist es notwendig, dass der Fahrstreifen bekannt ist, auf dem sich das Fahrzeug befindet. Hierfür wurde eine Map-Matching-Funktion implementiert, welche die absoluten Positionen aller Objekte jeweils genau einem Fahrstreifen zuordnet.

Digitale Karte / Straßenmodell

Für die Planung und Abstimmung von Manövern sowie für das Map-Matching ist es notwendig, dass ein abstraktes Verständnis des Straßenraums vorliegt. Daher wurde in IMAGinE eine Darstellungsform für Karten entwickelt, welche die Anforderungen der sechs Funktionen erfüllt. Für dieses Straßenmodell gibt es einen Kartenserver, der aus anderen Formaten, z. B. OpenDrive, Kartendaten in einem definierten Umkreis extrahiert und umwandelt. Die Karten können dann über ROS-Topics von allen anderen Komponenten benutzt werden. Daneben gibt es eine API, über die bestimmte Funktionalitäten, wie z. B. Map-Matching genutzt werden können.

Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit, dass dynamische Straßendaten, die vom Supportserver mitgeteilt werden, z. B. Straßensperrungen, vom Kartenserver verarbeitet und in dem Straßenmodell dynamisch assoziiert werden. Als Grundlage für das Straßenmodell werden Frenet-Koordinaten verwendet, um kooperativ Trajektorien planen zu können.

Datenextraktionskomponenten

Für die globale und lokale Objektliste gibt es jeweils eine Komponente, die diese Listen aus den Ringspeichern extrahiert und den anderen Modulen über die entsprechenden Topics zur Verfügung stellt. Diese Listen können sortiert werden nach Abstand zum Ego-Fahrzeug und nach einer Objekt-Fitness, die sich aus der Objektzuverlässigkeit berechnet, welche auf den Kovarianzen basiert.

2.3 Visualisierung

Für RViz wurde eine Visualisierung entwickelt, die das Ego-Fahrzeug, Kartendaten, die Objekte aus dem Umfeldmodell und Trajektorien anzeigen kann. Zusätzlich gibt es eine Anzeige, welche Werte der Objekte darstellt. Nachfolgende Abbildung zeigt einen Screenshot der Visualisierung.

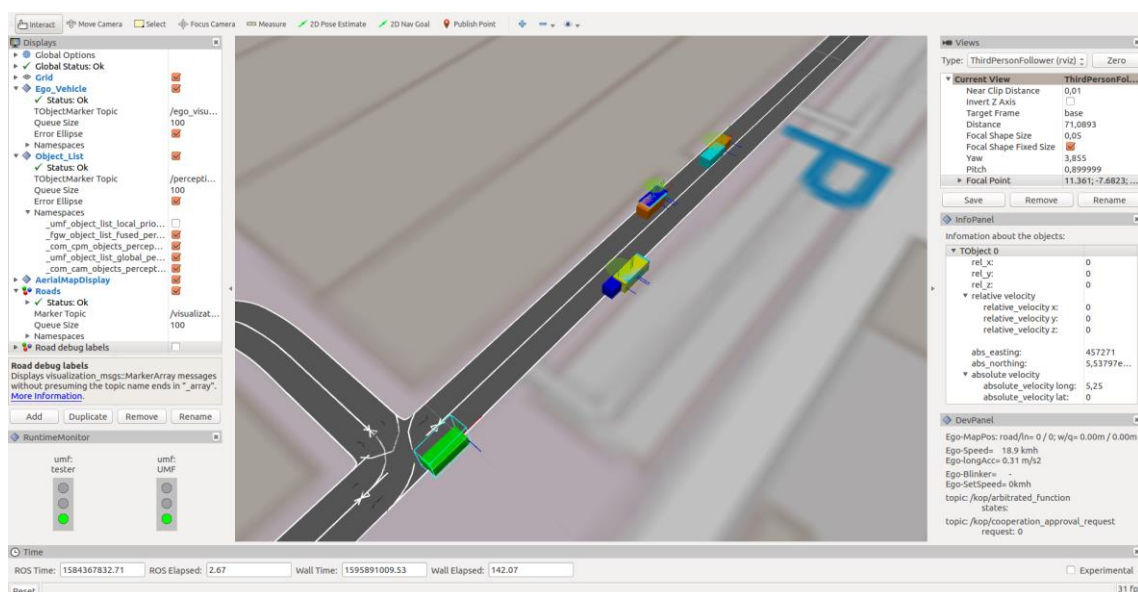


Abbildung 4: IMAGInE Umfeld-Visualisierung

2.4 Kommunikationsmodul

Das Kommunikationsmodul (COM-Modul) erfüllt die Aufgabe der Übertragung der benötigten Daten zwischen den einzelnen Fahrzeugen und Infrastruktur-Stationen. Die hierzu verwendete Hardware sind die waveBEE-Geräte, welche in den Fahrzeugen und der beteiligten Infrastruktur verbaut worden sind. Die waveBEEs unterstützen wahlweise den Standard ITS-G5 / 802.11p oder den Austausch via LTE und einem GeoServer im Internet. Das Kommunikationsmodul stellt hierbei die Schnittstelle zwischen den Daten innerhalb des IMAGInE-Systems und der waveBEE dar. Im Folgenden werden die einzelnen ausgetauschten Daten näher beschrieben.

CAM (Cooperative Awareness Message)

Die CAM-Nachrichten dienen dazu, andere Kommunikationsteilnehmer über die eigene Situation zu informieren. Neben der GNSS-Position werden unter anderem noch weitere Informationen wie z.B. die aktuelle Ausrichtung, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie statische Daten zum eigenen Fahrzeug, z.B. Dimensionen, übermittelt. Da sowohl die Positionsinformation vom GNSS-Sensor als auch die anderen Bewegungsdaten fahrzeugintern aufgenommen werden, hat diese Nachricht eine hohe Genauigkeit bezüglich der eigenen Fahrzeugdaten.

Das Kommunikationsmodul extrahiert die benötigten Daten aus den verschiedenen im IMAGinE-System vorhandenen Nachrichten und transferiert diese mittels der waveBEE-API an das waveBEE-Gerät zur Übertragung an andere Fahrzeuge. Ankommende CAM-Nachrichten anderer Fahrzeuge werden bereits auf dem waveBEE-Gerät gesammelt. Die gesammelten Daten werden vom Kommunikationsmodul dann in das IMAGinE-interne Format umgewandelt und als Objektliste in das IMAGinE-System weitergeleitet. Somit kann jedes Fahrzeug die Positions- und Bewegungsdaten der anderen Kommunikationsteilnehmer erhalten und auswerten.

CPM (Collective Perception Message)

Die CPM-Nachrichten dienen zum Austausch von lokalen Sensordaten über Fahrzeugsensorgrenzen hinaus und werden genutzt um das eigene Umfeldmodell zu erweitern. Hierzu wird von jedem Fahrzeug die Ergebnisobjektliste der Datenfusion lokaler Sensordaten an die anderen Kommunikationsteilnehmer versandt. Diese Liste enthält Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Dimensionen relativ zum sendenden Fahrzeug sowie dessen Eigenposition und Bewegungsdaten. Nicht alle diese Daten der einzelnen erkannten Objekte müssen gefüllt sein, da nicht alle von jedem Fahrzeugsensor erkannt werden können. Damit Empfänger der CPMs die Genauigkeit der ermittelten Daten einschätzen können, ist auch die Übertragung von Varianzen für einzelnen Werte nötig.

Das Kommunikationsmodul liest die Ergebnisobjektliste aus dem IMAGinE-System, kodiert sie um in das Format, das die waveBEE-API für CPMs vorgesehen hat, um sie dann durch den CPM-Service des waveBEE-Geräts an andere Fahrzeuge zu senden. Die von anderen Fahrzeugen empfangenen CPM-Nachrichten werden einzeln in interne Ausgangsobjektlisten umkodiert und in das IMAGinE-System weitergeleitet, wo sie anschließend vom Umfeldmodell zur Erzeugung einer fahrzeugübergreifenden Fusion verwendet werden können.

MCM (Maneuver Coordination Message)

Die MCM-Nachrichten dienen zum Austausch der verschiedenen, zur kooperativen Abstimmung benötigten Trajektorientypen zwischen den Fahrzeugen. Sie beinhalten neben dem Fahrzeugidentifikator vor allem Referenz-, Bedarfs- und Alternativtrajektorien des sendenden Fahrzeugs.

Das Kommunikationsmodul erfüllt für diesen Nachrichtentyp selbst die Kodierung der Nachrichten in ASN.1 und versendet diese unter Verwendung des generischen ASN-Services der waveBEE

zwischen den Fahrzeugen. Die ankommenden MCM-Nachrichten werden dekodiert und zur weiteren Verarbeitung an das IMAGinE-System weitergeleitet. Ähnliches gilt für die Nachrichtentypen ITDM (IMAGinE Traffic Distribution Message) und IDSM (IMAGinE Driving Strategy Message), die von einigen in IMAGinE entwickelten Verfahren zur kooperativen Abstimmung auf fahrstrategischer Ebene genutzt werden.

ITDM (IMAGinE Traffic Distribution Message)

Die ITDM-Nachrichten werden eingesetzt, um die kooperativ strategische Verkehrsverteilung zu realisieren. Sie dienen einerseits dazu, eine von der Verkehrszentrale gewünschte Verkehrsverteilung zu publizieren, gleichzeitig dienen sie zum Austausch erforderlicher Daten zwischen den Fahrzeugen die für den Kooperationsprozess erforderlichen sind.

Das Kommunikationsmodul erfüllt für diesen Nachrichtentyp selbst die Kodierung der Nachrichten in ASN.1 und versendet diese unter Verwendung des generischen ASN-Services der waveBEE zwischen den Fahrzeugen. Die ankommenden ITDM-Nachrichten werden dekodiert und zur weiteren Verarbeitung an das IMAGinE-System weitergeleitet.

IDSM (IMAGinE Driving Strategy Message)

Die IDSM-Nachrichten sind generische Nachrichten, die für strategische Abstimmungen über verteilte Zustandsautomaten verwendet wird. Die IDSM-Nachrichten bieten die Möglichkeit, dass sich Fahrzeuge synchron abstimmen können.

3 BESCHREIBUNG DER KONZEPTE ZUR KOOPERATIVEN MANÖVERABSTIMMUNG

3.1 Übersicht der partnerspezifischen Verfahren zur Untersuchung der Aspekte von Manöverkoordinierung

Im Rahmen des Projektes IMAGinE sind mehrere Konzepte zur kooperativen Manöverabstimmung durch die Partner eingebracht worden, die in der nachfolgenden Übersicht zusammengefasst werden. Dabei wurden die Konzepte gemäß ihren wesentlichen Eigenschaften in folgende Kategorien eingeordnet. Zu berücksichtigen ist hierbei insbesondere die Unterscheidung bei der Charakteristik hinsichtlich *implizit* und *explizit* (siehe unten).

- **Konzept:** Kurzbezeichnung des Konzepts
- **Projektpartner:** Projektpartner, der dieses Konzept in IMAGinE eingebracht hat
- **Charakteristik:** Übergreifende Merkmale des Konzepts zum Prozess des Verhandelns bei einer Kooperation (implizit und/oder explizit), zu seinem Ablauf (kontinuierlich und/oder ereignisgesteuert) sowie zu seiner Steuerung (zentral und/oder dezentral)
 - *explizit:* Eine explizite Kooperation findet mit Kooperationspartnern statt, die ihre Kooperationsbereitschaft ausdrücklich, d. h. eindeutig und unmissverständlich den kooperationsbedürftigen Kooperationspartner zusagen, und Kooperationsbereitschaft nötigenfalls vor Kooperationsabschluss auch explizit widerrufen. Dies muss durch den Austausch für den Empfänger eindeutiger Informationen geschehen, etwa durch die Kooperationsbereitschaft des Senders und den betroffenen Kooperationspartnern eindeutig zuzuordnende Signale. Auch eine Ableitung der Information aus mehreren Signalen ist dann möglich, wenn die Eindeutigkeit der Ableitung für alle Empfänger auch unter unterschiedlichen Bedingungen (z.B. Kartenverwendung) dauerhaft gewahrt bleibt. Eine Anfrage nach Kooperation ist dann explizit, wenn sie eindeutig bestimmte Empfänger bezeichnet, deren Kooperationsbereitschaft angefragt wird. Explizite Kooperation enthält typischerweise eine Abstimmungsphase und eine Durchführungsphase.
 - *implizit:* Bei einer impliziten Abstimmung findet zwischen den Kooperationspartnern ein Nachrichtenaustausch statt, aus dem die Kooperationspartner selbst nach eigenem Ermessen, etwa unter eigener Auswertung der Situation unter Anwendung etwaiger Regeln, in eigener Verantwortung auf die Kooperationsbereitschaft anderer Partner schließen können, ohne dass die Voraussetzungen der expliziten Kooperation gewährleistet sind. Jeder Teilnehmer berücksichtigt diese Information bei sich in seiner weiteren Planung und passt ggf. seine Absichten an, um ein übergreifend günstigeres Ergebnis zu erzielen. Erst aus den Reaktionen anderer Teilnehmer kann auf deren Eingehen auf eigene Wünsche geschlossen werden.

- *kontinuierlich*: Mögliche Kooperationspartner senden zyklisch Nachrichten zur Unterstützung möglicher Kooperationen aus, auch wenn sie selbst gerade nicht Kooperation anfragen oder nicht bestimmte Kooperationen gewähren möchten.
- *ereignisgesteuert*: Kooperationspartner senden Nachrichten zur Unterstützung oder Durchführung von Kooperationen nur bei Bedarf aus.
- *zentral*: Eine ausgezeichnete, zentrale Instanz ("Master") entscheidet – zumindest in bestimmten Zeiträumen – über die Durchführung und Steuerung von Kooperationen. Andere Kooperationspartner liefern Informationen und Rückmeldungen.
- *dezentral*: Kooperationen werden ohne ausgezeichnete, steuernde Instanz gleichberechtigt gestartet, durchgeführt und beendet ("Peer-to-Peer").
- **Planungsprinzip**: Elemente des Konzepts, anhand deren ein kooperatives Manöver geplant wird (Intentionen, Relationen und/oder Situationen) sowie entsprechende Planungsebene (strategisch, taktisch und/oder operativ). Beispielsweise können Intentionen in Form von Trajektorien ausgeführt werden.
- **Abstimmungsprinzip**: Konzept-eigener Auslöser für die Kooperation (Konflikt und/oder sonstiges Ereignis) sowie Vorgehensweise bei der Suche einer kooperativen Lösung – für alle am Manöver beteiligten Partner, wobei das Ego-Fahrzeug unwesentlich berücksichtigt wird, oder nur für das Ego-Fahrzeug (global und/oder lokal).
- **Luftschnittstelle**: Von dem Konzept verwendete V2X-Nachricht (MCM, IDSM, ITDM und/oder andere) sowie ihr maßgeblicher Inhalt (Trajektorien, Session-Zustände, Verteilung-Optionen und/oder andere).
- **Fahrfunktion**: Mit dem Konzept prototypisch umgesetzte Fahrfunktion in IMAGinE.

Tabelle 1: Übersicht der partnerspezifischen Konzepte in IMAGinE

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

Konzept	Projektpartner	Charakteristik	Planungsprinzip	Abstimmungsprinzip	Luftschnittstelle	Fahrfunktion
Targets 2019	Opel Automobile GmbH	implizit kontinuierlich dezentral	strategisch taktisch operativ	global	1 langfristiges Ziel 1..n mittelfristige Ziele n..m kurzfristige Ziele	
Bbasic 2019	BMW AG	explizit ereignisgesteuert dezentral	Intentionen Relationen	sonstiges Ereignis	MCM	F1
			taktisch	global lokal	n Attribute m Relationen	
BBB 2019	BMW AG	explizit kontinuierlich dezentral	Relationen Intentionen	Konflikt sonstiges Ereignis	MCM	F1
			taktisch	global lokal	n Attribute m Relationen k Bewegungsbereiche	
Collaborative Maneuver Protocol (CMP)	Mercedes-Benz AG/DCAITI	explizit Dezentrale synchrone State-Machine	Relationen (Rollen)	Zustandsänderung	IDSMS	F2
			strategisch taktisch	global lokal	1 Session-Zustand	
Truck-LongControl 2019	MAN Truck & Bus SE	implizit kontinuierlich dezentral	Intentionen	Konflikt	MCM	F2
			strategisch taktisch	global lokal	1 Plan-Trajektorie 0..1 Wunsch-Trajektorien	
Truck-Overtaking 2017/18	MAN Truck & Bus SE	explizit dezentral	Relationen (Rollen)	sonstiges Ereignis	IDSMS	F6

Konzept	Projektpartner	Charakteristik	Planungsprinzip	Abstimmungsprinzip	Luftschnittstelle	Fahrfunktion
			strategisch taktisch	global lokal	1 Session-Zustand	
Traffic Distribution (ITDM)	Die Autobahn GmbH des Bundes	implizit zentral	Situationen	sonstiges Ereignis	ITDM	F4
			strategisch	global	<i>n</i> Verteilung-Optionen	

3.2 Kooperationskonzept IMAGinE 2018

Das folgende Kapitel beschreibt das Konzept, wie es im GUA1 umgesetzt und für die Abschlussdemonstration im Fahrzeug verwendet wurde.

3.2.1 Grundkonzept

3.2.1.1 Annahmen

Für die Manöverkoordinierung ist der Austausch von Nachrichten zwischen lokal benachbarten Fahrzeugen notwendig. Es wird davon ausgegangen, dass die genutzte Kommunikationstechnologie in der Lage ist, Nachrichten von einem Fahrzeug zu allen Fahrzeugen im Umkreis von mehreren hundert Metern per Funk zu übertragen. Welche Mindestreichweite für das Konzept notwendig ist, muss im Laufe der weiteren Arbeiten noch ermittelt werden. Das hier vorgestellte Konzept zu Manöverkoordinierung basiert auf folgenden Annahmen.

Das Konzept basiert auf dem Austausch von Trajektorien. Dabei wird angenommen, dass die Trajektorien eine zeitliche Länge zwischen 1 und 30 Sekunden haben. Für kürzere Trajektorien macht eine Manöverkoordination nicht viel Sinn, da der Abstimmungsprozess selber etwas Zeit benötigt. Längere Manöver lassen sich mit einer Trajektorie nicht sicher genug planen, so dass eine Abstimmung auf Basis von Trajektorien wenig sinnvoll erscheint. Die exakten zeitlichen Begrenzungen müssen im weiteren Projektverlauf noch ermittelt werden.

Um erkennen zu können, wann eine Manöverkoordinierung notwendig ist, und zur Festlegung, welcher Verkehrsteilnehmer welche Rolle bei der Koordinierung einnimmt, sind Vorfahrtsregeln notwendig. Diese werden beispielsweise in Deutschland durch die StVO festgelegt.

Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge unvollständiges Wissen haben und dass dieses Wissen auch nicht mittels Kommunikation vollständig hergestellt werden kann. Deshalb muss das Konzept so ausgelegt werden, dass jedes Fahrzeug, welches an der Koordinierung beteiligt ist, seine eigenen Entscheidungen trifft und der Prozess der Koordinierung entsprechende Freiheiten vorsieht.

Die Zukunft kann nicht präzise vorhergesagt werden. Bei den hier ausgetauschten Trajektorien handelt es sich um Prädiktionen, die auf der Basis von Modellannahmen erstellt worden sind. Trotz allem können unvorhergesehene Ereignisse auftreten, die diese Prädiktionen ungültig machen.

Die Manöverkoordinierung erfolgt dezentral, das heißt, es gibt keine zentrale Instanz, die die kooperative Manöverabstimmung steuert.

3.2.1.2 Übertragene Information

Zwischen den Fahrzeugen werden folgende Informationen ausgetauscht, die im nachfolgenden Unterkapitel näher erläutert werden:

- Die Bezugstrajektorie des Fahrzeugs

- Eine Anzahl M (mit $M \geq 0$) von Bedarfstrajektorien
- Eine Anzahl N (mit $N \geq 0$) von Alternativtrajektorien
- Einen relativen Kostenwert C (mit $-1 \leq C \leq 1$) für jede übertragene Trajektorie. Die relativen Kostenwerte der Trajektorien sind wie folgt festgelegt:
 - Die Bezugstrajektorie hat den Kostenwert C_0 im Intervall $-1 \leq C_0 \leq 1$
 - Bedarfstrajektorien haben einen Kostenwert $-1 \leq C < C_0$
 - Alternativtrajektorien haben einen Kostenwert $C_0 < C \leq 1$
- Optional: Zusatzinformation für jede Trajektorie:
 - Eine Kategorisierung: z.B. Kooperationsangebot / Notfalltrajektorie / Einsatztrajektorie / etc
 - Als Konzepterweiterung: die Kategorie „Fahrverschlagn“, um Trajektorien für andere Fahrzeuge zu versenden
 - Einer Liste von V2X-Ids anderer Fahrzeuge, auf die sich die Trajektorie mit ihrer Kategorisierung bezieht
 - Es können auch mehrere Kategorien angegeben werden, um z.B. gleichzeitig ein Kooperationsangebot und eine Kooperationsabsage darzustellen. Jede Kategorie hat optional ihre Liste von V2X-Ids.
- Optional: Automatisierungsgrad:
 - *könnte theoretisch nützlich sein um die "Qualität" sowohl der Trajektorien als auch gewährter Zusagen einzuschätzen. Wurde in der Implementierung nicht verwendet.*
- Optional: Verhandlungs-Timeout:
 - *könnte theoretisch nützlich sein, falls es mehrere in Frage kommende Kooperationspartner geben sollte. Wurde in der Implementierung nicht verwendet.*

Für die Kodierung aller dieser Daten zur Übertragung wird die im Rahmen des Projektes erarbeitete MCM (Maneuver Coordination Message) verwendet. Trajektorien werden dort ausgehend von einer absoluten Startposition (GNSS) in einer Frenet-Darstellung definiert. Das Frenet-System folgt der Mitte des jeweiligen Fahrstreifens. Fahrstreifenwechsel, bzw. Fahren über Kreuzungen bedeuten Wechsel des Frenet-Systems und werden als relative Beschreibung übertragen. Die räumliche und zeitliche Bewegung innerhalb eines Frenet-Systems wird durch Polynome angegeben.

3.2.1.3 Definition der Signale

3.2.1.3.1 Bezugstrajektorie

- Die Trajektorie, der das Fahrzeug aktuell folgt und die die Sollgröße für den Fahrregler / Fahrer ist.
- Bezugstrajektorien sollen untereinander konfliktfrei/kollisionsfrei sein.
- Treten Konflikte/Kollisionen auf, werden sie gemäß StVO gelöst. Ein Konflikt muss von demjenigen Fahrzeug gelöst werden, das gemäß der StVO nachrangig ist. Das bevorzugte Fahrzeug darf also weiterhin seine konfliktbehaftete Trajektorie versenden. Bleibt der Konflikt bestehen, dann deutet es auf ein unterschiedliches Situationsverständnis hin und **beide** Fahrzeuge müssen den Konflikt auflösen, z.B. in dem sie verzögern.

3.2.1.3.2 Alternativtrajektorien

- Eine Trajektorie, die teurer als die Bezugstrajektorie ist, aber die das Fahrzeug trotzdem ggf. bereit wäre zu fahren. „Ggf.“ bedeutet hier „unter Vorbehalt“, d.h. bevor eine Alternativtrajektorie zur Bezugstrajektorie werden kann, muss möglicherweise noch der Fahrer seine Zustimmung geben, oder es findet noch eine Bewertung der sich ergebenden Gesamtsituation statt, wobei evtl. final geprüft wird, ob den eigenen Zusatzkosten einem (nach lokaler Sicht) ausreichenden Benefit bei den anderen Fahrzeugen gegenüberstehen.
- Da eine Alternativtrajektorie ein realistisches Kooperationsangebot sein sollte, sollte sie konfliktfrei mit anderen Bezugstrajektorien sein. Im Gegensatz zu den Bezugstrajektorien ist dies nicht vorgeschrieben, denn Alternativtrajektorien gehören zum Verhandlungsprozess.

3.2.1.3.3 Bedarfstrajektorien

- Eine Trajektorie, die besser das gewünschte Fahrziel erfüllt, somit günstiger als die Bezugstrajektorie ist.
- Konfliktbehaftet mit anderen Trajektorien. „Andere Trajektorien“ sind hier ausschließlich fremde Bezugstrajektorien. Falls diese z.B. aufgrund eines unterschiedlichen Planungshorizontes zu kurz sind und es nur in der internen Extrapolation zu Konflikten kommt, dürfen keine Bedarfstrajektorien versendet werden.

Das nachfolgende Bild verdeutlicht die verschiedenen Trajektorien.

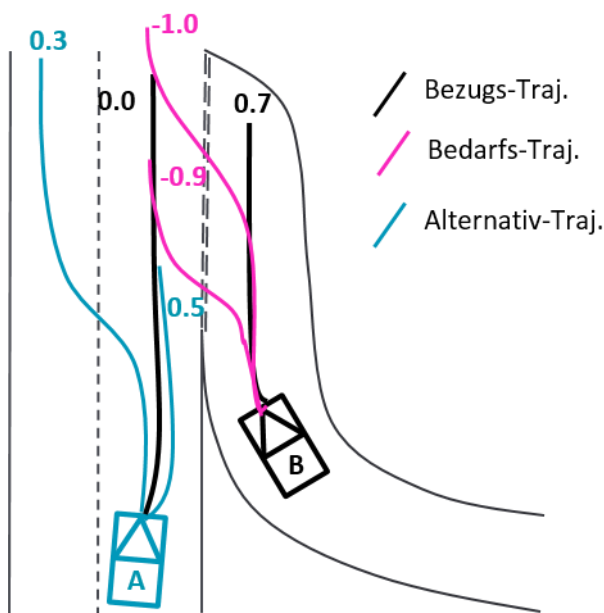


Abbildung 5: Das bevorrechtigte Fahrzeug A bietet Alternativtrajektorien an. Das nachrangige Fahrzeug B sendet Bedarfstrajektorien. Die Bezugstrajektorien sind kollisionsfrei.

3.2.1.3.4 Kategorien

Als optionale Information ist vorgesehen, dass jede Trajektorie mit einer zusätzlichen Kategorieinformation versehen werden kann. Diese Kategorieinformation kann hilfreich für die Berücksichtigung der Trajektorie in der Manöverplanung in den anderen Fahrzeugen sein. Im Prinzip kann jeder Typus von Trajektorien mit einer Kategorieinformation versehen werden.

- **Notfalltrajektorie:** Folgt das Fahrzeug dieser Trajektorie, dann befindet es sich in einem technischen (z. B. Reifenplatzer) oder situationsbedingten Notfall (z. B. Kind läuft auf Fahrbahn), d. h. es wird sich nicht an die normalen Verkehrsregeln halten können (z. B. Halten auf Autobahn) oder stellt eine potenzielle Gefährdung für andere Fahrzeug dar (durch starkes bremsen/lenken).
- **Kooperationsangebot:** Diese Trajektorie stellt ein Angebot an andere Fahrzeuge dar, um deren Bedarf zu ermöglichen. Die betroffenen Fahrzeuge können über ein weiteres optionales Feld - der V2X-ID - direkt adressiert werden. Ebenso ist ein Feld vorgesehen, um eine bestimmte (Bedarfs-)Trajektorie eines Fremdfahrzeuges zu adressieren und somit das Angebot auf einen bestimmten geäußerten Bedarf zu beschränken.
- **Kooperationsabsage:** Diese Trajektorie stellt eine Absage an eine Kooperationsanfrage eines anderen Fahrzeugs dar, die dieses mittels Bedarfstrajektorien geäußert hat. Die betroffenen Fahrzeuge können über ein weiteres optionales Feld - der V2X-ID - direkt adressiert werden. Ebenso ist ein Feld vorgesehen, um bestimmte (Bedarfs-)Trajektorien eines Fremdfahrzeuges zu adressieren, und somit die Absage auf einen bestimmten geäußerten Bedarf zu beschränken.

- **Einsatzfahrzeug:** Auf dieser Trajektorie hat das Fahrzeug besonderen Vorrang, da es sich im Einsatz befindet. Dies kann die Information aus der CAM über "Einsatzfahrzeuge im Einsatz" ergänzen.
- **Fahrvorschlag:** Über diese Kategorie können in Verbindung mit dem Feld der V2X-ID Trajektorien als Manöver-Vorschläge für andere Fahrzeuge versendet werden. Dies kann z. B. von Einsatzfahrzeugen genutzt werden, die anderen Fahrzeugen vorschlagen wollen, wie eine Rettungsgasse gebildet werden könnte. Oder auch von einer Infrastruktureinheit an Kreuzungen, um den Verkehrsfluss zu optimieren. Fahrvorschlüsse sind unverbindlich. Diese Kategorie ist als Forschungsthema zu sehen, genauso wie weitere Kategorien für zukünftige Erweiterungen genutzt werden könnten.

3.2.1.3.5 Kostenwerte für die Kooperation

Die Kostenwerte spiegeln wider, ob und wie stark ein Fahrzeug auf der angegebenen Trajektorie von Kooperationszugeständnissen anderer profitiert oder selber zusätzliche Aufwände hat, weil es unter Verzicht auf eigenen Vorteil anderen ein Manöver ermöglicht. Um ein übergreifend gemeinsames Verständnis zu ermöglichen, werden die Kosten auf ein Intervall von -1 bis 1 normiert. "-1" repräsentiert dabei Trajektorien, die - unter Beachtung der Situation - das bestmögliche durch Kooperation erreichbare Ergebnis für das eigene Fahrzeug darstellen. Auf der anderen Seite repräsentiert "1" Trajektorien, die das maximale Zugeständnis an andere zur Realisierung ihrer Manöver enthalten.

Fahrzeug-intern können die Kooperationskosten von Trajektorien durch die Kosten zweier Grenztrajektorien ermittelt werden, die - aus Fahrzeugsicht - der Beschreibung je einer der beiden obigen Intervallgrenzen entsprechen. Die anderen Trajektorien inkl. der Bezugstrajektorie werden entsprechend einsortiert, z. B. dadurch, dass deren mit der lokalen Kostenfunktion ermittelten internen Kosten in Bezug zu den internen Kosten der beiden Grenztrajektorien gesetzt werden.

Die Ermittlung der beiden Grenztrajektorien kann mit ausreichender Genauigkeit folgendermaßen vorgenommen werden: Für die bestmögliche Trajektorie (also untere Grenztrajektorie) bestimmt man eine Ego-Trajektorie in einem Umfeld, in dem alle zur Kooperation fähigen anderen Fahrzeuge vernachlässigt werden, da diese im besten Fall JEDEN Kooperationswunsch ermöglichen (Fahrphysik wird ignoriert). Die Ermittlung der oberen Grenztrajektorie, die widerspiegelt, welche Eingeständnisse zur Trajektorienermöglichung anderer noch akzeptabel sind, ist weniger eindeutig. Es sind z.B. folgende Ansätze denkbar, die alle von der Genauigkeit für das Konzept ausreichend sind, aber in aufsteigender Reihenfolge ggf. zu einem global gesehen optimaleren Ergebnis führen.

- Es wird eine pauschale fahrzeuginterne Kostengrenze definiert: Es wird dann die Trajektorie gewählt, deren Kosten z. B. 20% über der eines internen Referenzkostenwertes liegen. Die internen Referenzkosten können z. B. aus der Bezugstrajektorie, oder der bestmöglichen Trajektorie, oder bevorzugt aus einer Kombination beider ermittelt werden. In IMAGinE wurde Erstes implementiert.

- Die obige Kostengrenze wird abhängig vom Manöver / der Situation angepasst.
- Im Fall des manuellen Fahrens kann die Kostengrenze aus dem Fahrerverhalten bei Kooperationsanfragen gelernt werden und wäre dann adaptiv.

Die Exaktheit der beiden Grenzen, bzw. deren Kosten, ist dabei nicht so wichtig, sondern die grundsätzliche Tendenz, bzw. die Relation untereinander. Das Verschicken der beiden Grenztrajektorien ist nicht unbedingt erforderlich, sondern kann zugunsten anderer Bedarfs- / Alternativtrajektorien (von denen das Fahrzeug annimmt, dass sie eine kooperative Situation insgesamt besser lösen) weggelassen werden.

3.2.2 Abstimmungskonzept

Das Konzept basiert auf zwei Grundlagen. Zum einen versendet jedes Fahrzeug permanent seine Bezugstrajektorie, um die anderen Fahrzeuge darüber zu informieren, wie es sich für die nächsten Sekunden bewegen wird - solange sich seine Situation nicht ändert. Dabei sind Bezugstrajektorien grundsätzlich erst einmal konfliktfrei untereinander - ein sich ergebender Konflikt muss von dem gemäß Verkehrsregeln nachrangigen Fahrzeugs gelöst werden, indem es seine Bezugstrajektorie anpasst. Zum anderen versendet jedes Fahrzeug permanent eine oder mehrere Alternativtrajektorien, die anderen Fahrzeugen einen Eindruck geben, inwieweit sie mit Unterstützung rechnen können, um ihre eigene Situation durch Kooperation anderer zu verbessern.

Wenn Fahrzeuge zu der Erkenntnis gelangen, dass sie Unterstützung anderer benötigen, dann teilen sie dies durch das Versenden einer oder mehrerer Bedarfstrajektorien mit. Zur Bestimmung der Bedarfstrajektorien nutzen sie dabei den Spielraum, der durch die Alternativtrajektorien aufgezeigt wird. Von der gestellten Kooperationsanfrage betroffene Fahrzeuge - d. h. deren eigene Bezugstrajektorie steht in Konflikt mit einer der empfangenen Bedarfstrajektorien - bewerten für sich intern, ob die sich dadurch für sie ergebenden Einschränkungen akzeptabel sind und passen ggf. ihre Bezugstrajektorie entsprechend an. Das Anpassen der Bezugstrajektorie ist für das anfragende Fahrzeug das implizite Signal, dass die Kooperationsanfrage akzeptiert wurde und es kann nun in den freigewordenen Manöverraum seine eigene Bezugstrajektorie hineinlegen.

Falls keine Alternativtrajektorien zur Verfügung stehen, oder die vorhandenen keinen ausreichenden Spielraum zur Lösung der Situation bieten, kann das Fahrzeug auch eine aus seiner Sicht bessere Bedarfstrajektorie versenden, die auf einem selbst geschätzten Spielraum basiert. Solche Bedarfstrajektorien haben ggf. eine geringere Chance von anderen Fahrzeugen akzeptiert zu werden, da es schwierig und aufwändig sein kann den eigenen Spielraum zu bestimmen. Um diese Situation zu vermeiden und auch die Rechenlast in den Fahrzeugen gering zu halten, ist es wichtig, dass jedes Fahrzeug zusätzlich zu seiner Bezugstrajektorie noch mindestens eine Alternativtrajektorie als informatives Kooperationsangebot versendet. Falls mehrere Manöver mit ähnlichen Grenzkosten möglich sind (auf Autobahn: bremsen oder Spurwechsel), ist es hilfreich, für jedes Manöver eine Alternativtrajektorie zu versenden.

Um die Kooperationskosten der eigenen Trajektorie bestimmen zu können und somit die anderen Fahrzeuge über den Grad ihrer Kooperationsbereitschaft oder ihres Kooperationsbedarfs zu informieren, berechnen die Fahrzeuge dabei permanent ihren maximalen Gewinn durch Kooperation und maximal-akzeptablen Aufwand für Kooperation, z.B. durch Bestimmung ihrer oberen und unteren Grenztrajektorien.

3.3 Konzeptvorstellung Volkswagen

3.3.1 Annahmen und Voraussetzungen

Der Ansatz von Volkswagen basiert auf der Idee, sämtliche Abstimmung allein durch den Austausch von Plan- und Wunsch-Trajektorien durchzuführen (s. Abbildung 6). Kooperierende Fahrzeuge sind dabei sowohl in der Lage, via V2X zu kommunizieren als auch Manöver automatisch durchzuführen. Dieser Annahme liegt die (noch zu beweisende) These zugrunde, dass ein solches Konzept auch für unterschiedliche Automatisierungsgrade wie auch für unterschiedliche V2X-Ausstattungsgrade funktioniert.

Vorausgesetzt wird hierbei, dass in den Fahrzeugen Regeln (z.B. die StVO) implementiert sind, welche die Fahrzeuge bei der Planung ihrer eigenen Plan- und Wunsch-Trajektorien (s. nachfolgende Absätze) berücksichtigen.

Angenommen wird zudem, dass dieser Ansatz generisch ist, das heißt für alle fahrbaren Manöver einsetzbar ist. Dabei wird berücksichtigt, dass die beteiligten Fahrzeuge ihre Planung auf einer jeweils unterschiedlichen Wissensbasis kalkulieren. Aufgrund dessen betrachtet dieser Ansatz zunächst keine sicherheitskritischen Funktionen. Das Ziel dieses Ansatzes ist daher primär eine Verbesserung der Prädiktion des Fahrverhaltens dynamischer Objekte im eigenen Relevanzbereich.

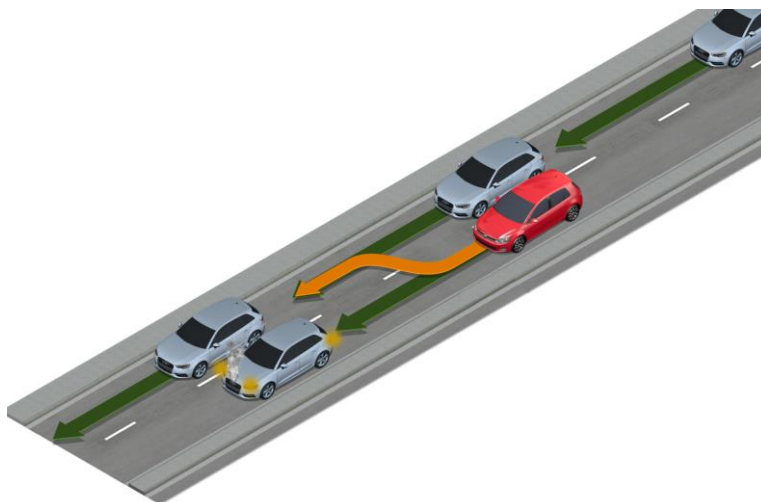


Abbildung 6: Konzept von Volkswagen zur Manöverabstimmung basierend auf dem Austausch von Plan-Trajektorien (grün) und Wunsch-Trajektorien (gelb)

3.3.2 Trajektorien

Die Nachricht für das hier vorgeschlagene Konzept beinhaltet die kontinuierliche Berechnung von Plan- und (optional) Wunsch-Trajektorien.

Die Plan-Trajektorie (s. Abbildung 6, grüner Pfeil) beschreibt dabei die prädiizierte Weg-Zeit-Linie auf Basis der aktuell dem Fahrzeug vorliegenden Informationen (z.B. aktuelle Geschwindigkeit, aktueller Lenkeinschlag, aktuelle Beschleunigung, Routenplanung der Navigation). Plan-Trajektorien sind definitionsgemäß stets untereinander kollisionsfrei. Verändert hingegen ein Fahrzeug seine aktuelle Fahrweise, beispielsweise durch eine Bremsung, so verändert sich auch dessen Plan-Trajektorie. Das kann bedeuten, dass die bisherige Lösung für eine Plan-Trajektorie nicht mehr beibehalten werden darf, da sie nicht mehr kollisionsfrei sein würde mit der Plan-Trajektorie eines anderen Fahrzeugs (s. Abbildung 7), was definitionsgemäß verboten ist.



Abbildung 7: Plan-Trajektorie ist nicht mehr erlaubt, da nicht mehr kollisionsfrei. Es muss stattdessen eine kollisionsfreie Lösung gefunden werden.

Es ist daher erforderlich, dass mindestens eines der beiden Fahrzeuge seine Trajektorie anpasst. Eine mögliche Anpassung wäre ein Fahrstreifenwechsel des eigenen, roten Fahrzeugs, um so die Trajektorien wieder kollisionsfrei zu gestalten ergo einen Unfall zu vermeiden.

Diese so genannte Wunsch-Trajektorie (s. Abbildung 8) resultiert aus einer gewünschten Abweichung von der Plan-Trajektorie. Im Gegensatz zur Plan-Trajektorie ignoriert die Wunsch-Trajektorie aber die Plan-Trajektorien anderer Fahrzeuge und muss somit nicht frei von Konflikten sein. Die Wunsch-Trajektorie stellt damit eine Kooperationsanfrage dar: Sie repräsentiert in diesem Beispiel den Wunsch eines Fahrstreifenwechsels, welcher aber ohne die Mitwirkung der Fahrzeuge auf dem benachbarten Fahrstreifen nicht umsetzbar ist. Dies zeigt sich durch den Konflikt der Wunsch-Trajektorie (gelb) mit den Plan-Trajektorien (grün) der anderen Fahrzeuge.

Die Kooperationsanfrage in Form der Wunsch-Trajektorie richtet sich an alle Fahrzeuge, deren Plan-Trajektorien mit der Wunsch-Trajektorie in Konflikt stehen. Würden diese Fahrzeuge ihre Plan-Trajektorien entsprechend anpassen, könnte so die Konfliktfreiheit wieder hergestellt werden.

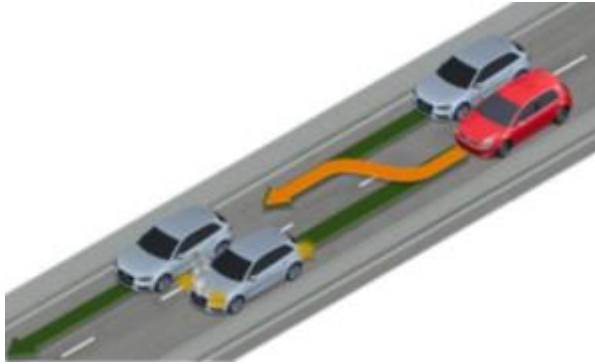


Abbildung 8: Wunscht-Trajektorie (gelb) als Reaktion auf die ungünstigen, weil nicht mehr konfliktfreien Plan-Trajektorien. Der Grund ist, dass eine Anpassung der Plan-Trajektorie eine Steigerung der Kosten zur Folge hätte; Die Wunscht-Trajektorie würde eine kostengünstigere Alternative darstellen (wenn sie akzeptiert würde).

Es liegt nun an der Kooperationsbereitschaft dieses Fahrzeugs, ob es der Anfrage des roten Fahrzeugs zustimmt und seine Trajektorie anpasst oder nicht. Die Bereitschaft zur Kooperation ist unter anderem abhängig von der individuellen Kosten-Abwägung (technisch umgesetzt in Form einer Kostenfunktion) des Fahrzeugs. Fällt diese akzeptabel aus, wird das Fahrzeug seine Plan-Trajektorie anpassen, so dass diese konfliktfrei zur Wunscht-Trajektorie des roten Fahrzeugs ist. Sobald dies der Fall ist, wird aus der Wunscht-Trajektorie eine Plan-Trajektorie und das rote Fahrzeug kann den Fahrstreifenwechsel durchführen.

3.3.3 Kostenfunktion

Vorausgesetzt die Wunscht-Trajektorie lässt sich wie beabsichtigt umsetzen, stellt diese aus Sicht des eigenen Fahrzeugs die bessere Alternative zur ursprünglichen Plan-Trajektorie dar. "Besser" bedeutet hier stets geringere Kosten. Dabei resultieren die Kosten aus einer Abwägung anhand von Parametern zu Fahrdynamik, gewünschtem Fahrkomfort, Fahrsicherheit und Zielerreichung (die so genannte Kostenfunktion des Ego-Fahrzeugs).

Ein weiteres Kriterium für die Kostenfunktion (und daraus resultierend die Kooperationsbereitschaft) ist auch die Beeinträchtigung anderer Verkehrsteilnehmer und das damit verbundene Risiko für einen selbst. So kann beispielsweise ein starkes Bremsen kooperativ sein (wie z. B. das kooperation-gewährende Fahrzeug in Abbildung 6), weil so der Fahrstreifenwechsel des anderen Fahrzeugs ermöglicht wird. Gleichzeitig erzeugt dies aber einen Konflikt mit der Trajektorie des nachfolgenden Fahrzeugs.

Einerseits ist der Fahrstreifen des roten Fahrzeugs in Abbildung 6 blockiert, was dafürspricht, ihm den Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen. Andererseits gefährdet zu starkes Bremsen auch den eigenen, nachfolgenden Verkehr. Für die Entscheidung für oder gegen eine Kooperation ist also auch die Berücksichtigung des Umfelds entscheidend, welches wiederum im fahrzeugeigenen Umfeldmodell hinterlegt ist.

3.3.4 Resultierendes Abstimmungskonzept

Das aus den obigen Überlegungen resultierende Abstimmungskonzept sieht zusammenfassend nun wie folgt aus:

1. Die Plan-Trajektorien der Fahrzeuge liegen vor und sind stets konfliktfrei.
2. Der Kooperationsbedarf wird in Form einer Wunsch-Trajektorie kommuniziert.
3. Der Kooperationspartner überprüft die Anfrage hinsichtlich seiner eigenen Kriterien zur Kooperationsbereitschaft.
4. Im Fall der Kooperation passt das Fahrzeug dann seine eigene Plan-Trajektorie an die Wunsch-Trajektorie des anderen Fahrzeugs an.
5. Die Wunsch-Trajektorie ist nun konfliktfrei und wird damit zur Plan-Trajektorie. Das rote Fahrzeug kann den Fahrstreifenwechsel durchführen.

Das Konzept sieht vor, die Plan- und Wunsch-Trajektorien regelmäßig neu zu generieren und zu versenden, beispielsweise in einer Frequenz zwischen 2 und 10 Hz gemäß der Kriterien, die auch für die Cooperative Awareness Message angesetzt wurden. Da der Relevanzbereich lokal ist, bietet sich hierfür auch eine Kommunikationstechnologie an, die Local Broadcast unterstützt, beispielsweise ITS G5.

3.3.5 Funktionsweise des Kooperativen Manöverplaners

Im Folgenden soll die Funktionsweise des partnerspezifischen kooperativen Manöverplaners von Volkswagen beschrieben werden, der auf dem obigen Abstimmungskonzept basiert. Dabei wird als beispielhafte Situation ein kooperativer Einfädelvorgang auf einer Autobahn verwendet (F1). Wie bereits dargestellt, funktioniert der Manöverplaner von Volkswagen kostenbasiert. Konkret berechnet der Manöverplaner kontinuierlich im Rahmen eines Planungszyklus' eine Vielzahl an fahrbaren Trajektorien, gewichtet diese mit einer Kostenfunktion und wählt jeweils die günstigste, kollisionsfreie Trajektorie für seine Planung aus („Plan-Trajektorie“). Für die Realisierung kooperativer Manöver werden aus der Menge an fahrbaren Trajektorien in jedem Planungszyklus bis zu drei vorläufige, sogenannte „Interims-Trajektorien“ gespeichert:

- Die günstigste Interims-Trajektorie, die **absolut kollisionsfrei** ist (I-AK)
- Die günstigste Interims-Trajektorie, die mit anderen **Plan-Trajektorien kollisionsfrei** ist, dabei aber fremde Wunsch-Trajektorien ignoriert (I-PK)
 - *wird nur gespeichert sofern diese sich von I-AK unterscheidet*
- Die günstigste Interims-Trajektorie, die fremde Plan- oder Wunsch-Trajektorien ignoriert und somit **nicht kollisionsfrei** ist (I-NK)
 - *wird nur gespeichert sofern diese sich von I-AK unterscheidet*

In einer nicht kooperativen Situation, wenn also keine Wunsch- oder Plan-Trajektorien mit Wunsch- oder Plan-Trajektorien anderer Verkehrsteilnehmer kollidieren, wird von einem Planer

nur die Interims-Trajektorie I-AK gespeichert, da die anderen möglichen Interims-Trajektorien sich nicht von der I-AK unterscheiden. Eine solche Situation ist in Abbildung 9 dargestellt. Die durchgezogene Linie hindert das einfädelnde Fahrzeug V01 daran eine auf die Autobahn auffahrende Trajektorie zu berechnen. Entsprechend existiert sowohl für das Fahrzeug V01 als auch das Fahrzeug V02, welches sich auf der Autobahn befindet, zum Zeitpunkt t_1 ausschließlich die Interims-Trajektorie I-AK, sodass diese im Planungszyklus als Plan-Trajektorien (P-V01 bzw. P-V02) verwendet werden (dargestellt in $t_{1.2}$).

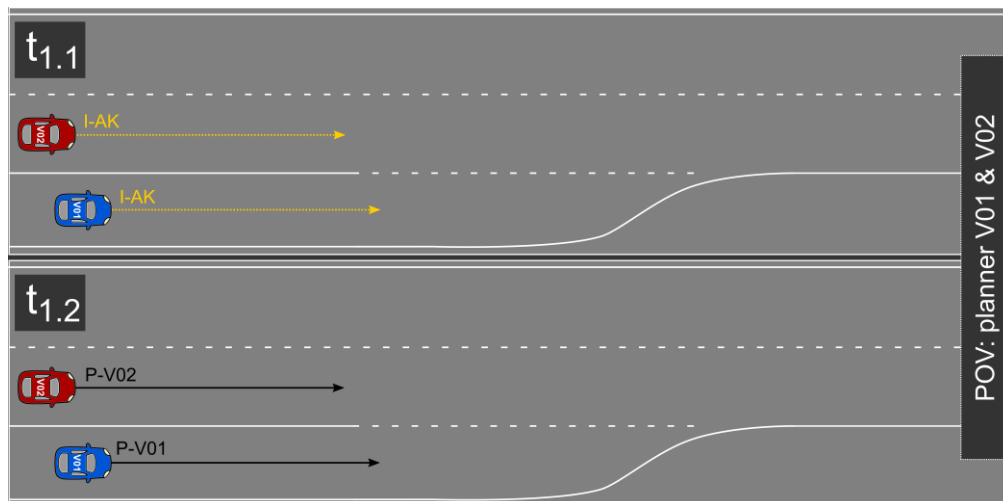


Abbildung 9: Darstellung eines Planungszyklus für V01 und V02, in welchem keine Kollisionen mit Plan- und Wunsch-Trajektorien des jeweils anderen Fahrzeuges vorliegen.

In einem späteren Planungszyklus (t_2) befindet sich V01 an einer Position, an der ein Einfädeln entsprechend der Straßenverkehrsordnung erlaubt ist. Dennoch wählt V01 in dieser Situation als günstigste I-AK Trajektorie ein Abbremsen auf dem Auffahrsstreifen aus, da alle anderen fahrbaren Trajektorien mit der Plan-Trajektorie von V02 (P-V02) kollidieren (vgl. Abbildung 10). Zusätzlich speichert V01 die Interim-Trajektorie I-NK, welche nicht kollisionsfrei mit der Plan-Trajektorie anderer Verkehrsteilnehmer sein muss. Im dargestellten Beispiel stellt diese einen Einfädelvorgang auf die Autobahn dar, da das Einfädeln zu diesem Zeitpunkt entsprechend der im Planer hinterlegten Kostenfunktion günstiger als ein Abbremsen auf dem Einfädelstreifen ist. Damit diese Interim-Trajektorie in naher Zukunft abgefahren werden kann, ist jedoch eine erfolgreiche Kooperation mit all jenen Verkehrsteilnehmern nötig, deren Plan-Trajektorien mit dieser Interim-Trajektorie in Konflikt steht. Dazu kann die Interims-Trajektorie I-NK in Form einer Wunsch-Trajektorie als MCM-Nachricht an andere Verkehrsteilnehmer geschickt werden. Um das zu häufige Senden von Kooperationswünschen und somit ein ineffizientes Kooperationsverhalten zu verhindern, enthält der kooperative Manöverplaner den Parameter MinCR (**Minimal Cost Reduction**), der ein Mindestmaß an Kostenersparnis für das Versenden eines Wunsches festlegt. Ein intelligentes Fahrzeug versendet somit immer dann einen Wunsch, wenn die Kosten der Interim-Trajektorie I-NK die Kosten der Interim-Trajektorie I-AK mindestens um die Höhe des Parameters MinCR unterschreiten. In der in Abbildung 10 dargestellten beispielhaften Situ-

ation wird angenommen, dass eine entsprechende Kostenersparnis vorliegt, sodass V01 in diesem Planungszyklus die Interims-Trajektorie I-NK zum Versenden einer Wunsch-Trajektorie (W-V01) als MCM-Nachricht verwendet ($t_{2.2}$). Als Plan-Trajektorie (P-V01) verwendet V01 in diesem Planungszyklus die kollisionsfreie Interims-Trajektorie I-AK.

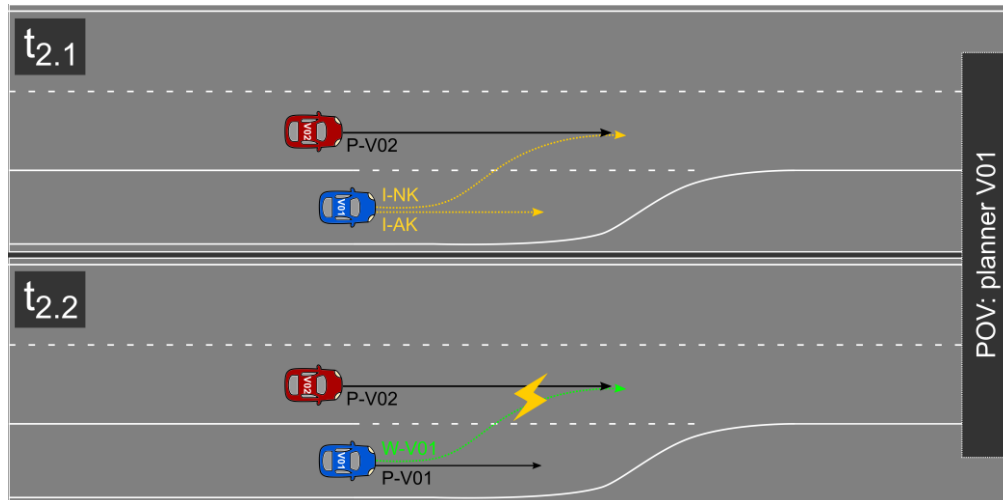


Abbildung 10: Darstellung eines Planungszyklus an der Einfädelspur aus Sicht von V01.

Sobald die Planer-Instanz eines Kooperationspartners einen Wunsch eines kooperativen Fahrzeuges in Form einer MCM-Nachricht erhält, muss diese abwägen, ob der Wunsch akzeptiert werden soll. Abbildung 11 zeigt eine solche Situation aus Sicht des Planers von V02. Da die Interims-Trajektorie I-AK kollisionsfrei mit der Wunsch-Trajektorie von V01 (W-V01) sein muss, stellt diese einen Spurwechsel auf die linke Fahrspur der Autobahn dar. In diesem Fall ergibt sich eine günstigere Interims-Trajektorie I-PK, welche Kollisionen mit den Wunsch-Trajektorien anderer Verkehrsteilnehmer ignoriert und somit keinen Spurwechsel vornimmt. In einer solchen Situation stellt sich für den Kooperationspartner (hier V02) die Frage nach einem erträglichen Maß an Mehrkosten, die akzeptiert werden, um den eingehenden Wunsch zu akzeptieren. Dazu vergleicht V02 die Kosten der beiden Interims-Trajektorien I-AK und I-PK. Um das zu häufige Akzeptieren von Kooperationswünschen und somit ein im Gesamtsystem betrachtetes ineffizientes, kooperatives Verhalten zu verhindern, enthält der kooperative Manöverplaner den Parameter **MaxCI**, der den maximalen Kostenzuwachs (**Maximal Cost Increase**) festlegt. Ein Verkehrsteilnehmer akzeptiert dabei immer dann einen Wunsch, wenn die Kosten der Interims-Trajektorie I-AK die Kosten der Interims-Trajektorie I-PK maximal um die Höhe des Parameters **MaxCI** überschreitet. Entsprechend sind in Abbildung 11 zwei Ergebnisse für den Planungszyklus dargestellt ($t_{3.2}$). Im Falle einer positiven Entscheidung, verwendet V02 die I-AK als neue Plan-Trajektorie ($t_{3.2_accept}$). Falls der Kostenzuwachs den Wert des **MaxCI** überschreitet, verwendet V02 dagegen die I-PK als neue Plan-Trajektorie ($t_{3.2_denial}$), sodass die Wunsch-Trajektorie von V01 weiterhin in Konflikt mit der Plan-Trajektorie von V02 steht. In diesem Fall wird aus Gründen der Nachvollziehbarkeit des Planer-Verhaltens die I-AK als sogenannte „Evaluations-Trajektorie“ in Simulati-

onsumgebungen visualisiert. Diese Trajektorie nimmt allerdings keinen Einfluss auf das Kooperationsverhalten und wird im Gegensatz zu Plan- und Wunschtrajektorien nicht als MCM-Nachricht versendet.

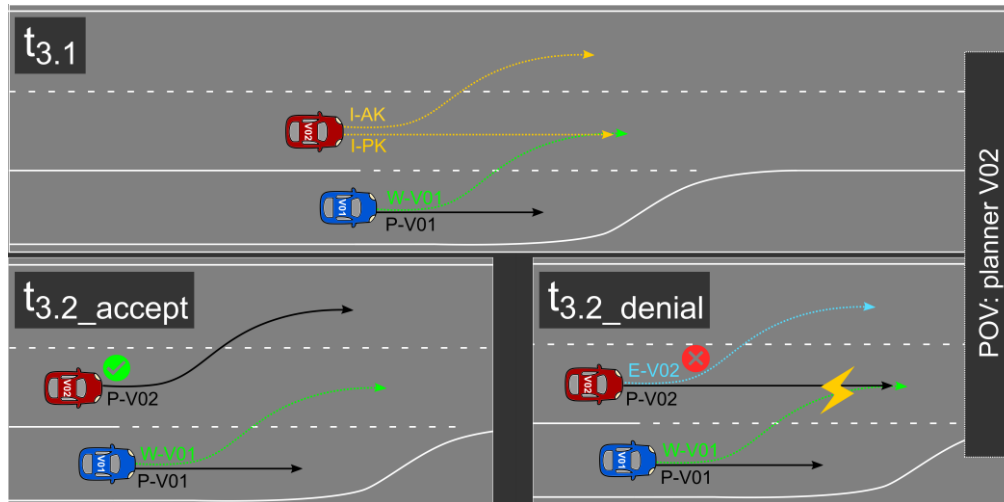


Abbildung 11: Darstellung eines Planungszyklus mit eingehender Wunsch-Trajektorie von V01 aus Sicht des Planers von V02.

Abbildung 12 stellt die Sicht des Planers von V01 in einem der darauffolgenden Planungszyklen dar. Im Falle einer akzeptierten Kooperation in t_3 , stellt die Plan-Trajektorie von V-02 (P-V02) keinen Konflikt mehr mit dem angefragten Spurwechsel dar, sodass die Interims-Trajektorie I-AK einen Einfädelvorgang darstellt ($t_{4.1_accept}$). Die I-AK kann somit von V01 als Plan-Trajektorie verwendet werden ($t_{4.2_accept}$). Im Falle einer Ablehnung der Kooperation im Planungszyklus t_3 , stellt die I-AK auch im Planungszyklus t_4 ein Abbremsen auf der Einfädelspur dar ($t_{4.1_denial}$). Analog zum Zeitpunkt t_3 würde eine günstigere Interims-Trajektorie I-NK gespeichert werden, welche die Kollision mit der Plan-Trajektorie P-V02 ignoriert. Wenn auch in diesem Planungszyklus die Kosten der I-NK gegenüber den Kosten der I-AK um mindestens den Faktor MinCR unterschreiten, versendet V01 wieder eine Wunsch-Trajektorie W-V01 als MCM Nachricht. Als Plan-Trajektorie wird die Interims-Trajektorie I-AK verwendet, sodass V01 auf der Einfädelspur abbremsen würde ($t_{4.2_denial}$). In einem darauffolgenden Planungszyklus würde V02 erneut die eingehende Wunsch-Trajektorie W-V01 bei der Auswahl seiner Plan-Trajektorie entsprechend dem beschriebenen Vorgehen berücksichtigen. Dieses kontinuierliche, iterative Versenden und Evaluieren von Plan-Trajektorien ermöglicht beiden Planer-Instanzen zu jeder Zeit auf sich verändernde Rahmenbedingungen zu reagieren. In Abbildung 13 ist abschließend ein möglicher Ausgang des Einfädelvorgangs im Falle einer Kooperation (t_{5_accept}) oder kontinuierlichen Ablehnung (t_{5_denial}) der Kooperationsanfragen von V02 dargestellt.

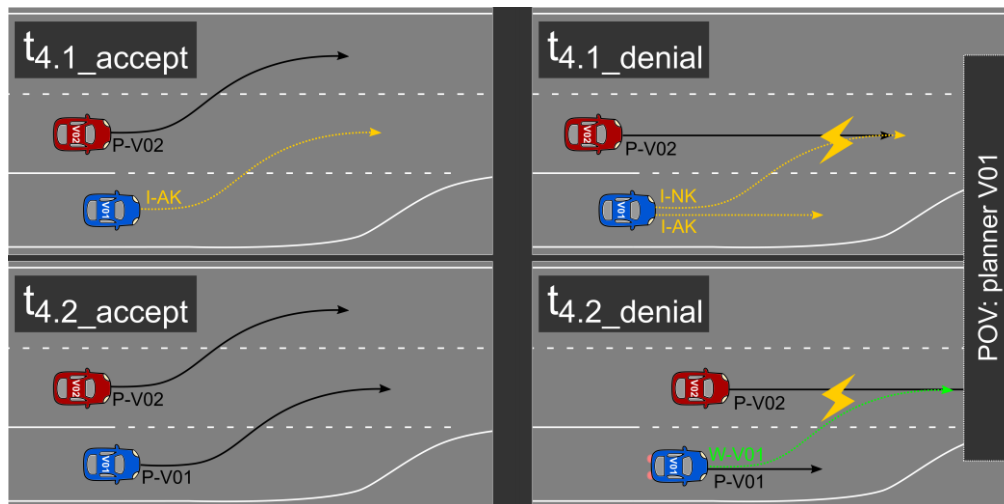


Abbildung 12: Darstellung eines Planungszyklus aus Sicht von V01, abhängig davon ob V02 im Planungszyklus t3 den Kooperationswunsch von V01 akzeptiert (links) oder abgelehnt (rechts) hat.

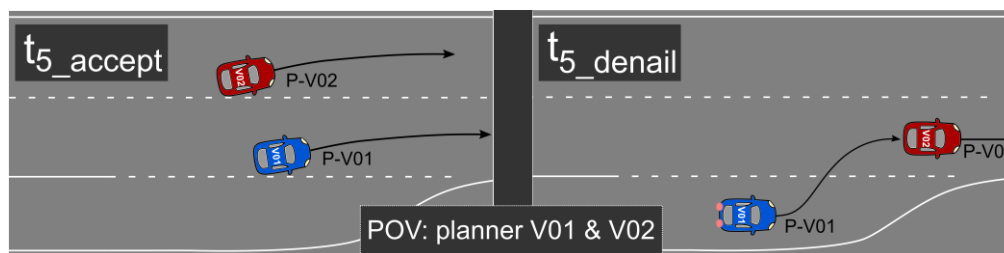


Abbildung 13: Darstellung der Plan-Trajektorie von V01 und V02 zu einem späteren Zeitpunkt, abhängig davon ob V02 im Laufe des Einfädelvorgangs einen Kooperationswunsch von V01 akzeptiert (links) oder kontinuierlich alle eingehenden Wunsch-Trajektorien abgelehnt (rechts).

3.4 Konzeptvorstellung OPEL

Im Laufe des Projektes IMAGinE sind bei OPEL mehrere partnerspezifische Lösungen für kooperative Manöverplanung und -Abstimmung entstanden, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Hierzu gehören im Wesentlichen das Verfahren *Opel Core* [1] sowie die Verfahren der Kooperation durch alternative Trajektorien und der Kooperation durch Ziele.

3.4.1 OpelCore 2018/19

Beim Verfahren OpelCore 2018/19 (im Weiteren *Opel Core* genannt) handelt es sich um ein implizites, kontinuierliches, dezentrales, intention-basiertes Abstimmungsverfahren. Das bedeutet, dass teilnehmende Fahrzeuge direkt ihre Intentionen in Form von Trajektorien mittels ad-hoc oder cellular V2X-Kommunikation austauschen können, um kooperativ Manöver zu planen und abzustimmen. Dieses Verfahren wurde bei OPEL in einer prototypischen Ausprägung entwickelt und für simulative Untersuchungen des Einflusses der Kooperation auf die Verkehrsqualität genutzt.

Ein mit *Opel Core* Verfahren ausgestattetes Fahrzeug bedarf einer dauerhaften Übertragung von nur einer Trajektorie, um die über V2X-Kommunikation ausgetauschten Datenmengen zu sparen und somit die Kanallast zu reduzieren. Darüber hinaus macht diese Charakteristik das Verfahren für den Einsatz im Mischverkehr (d. h. zwischen autonomen und manuell gesteuerten Fahrzeugen) geeignet, da die Kooperation dabei nur anhand einer Trajektorie pro Teilnehmer stattfindet. Im Falle des manuellen Fahrens wird die Trajektorie aus der Beobachtung der Fahrzeugbewegung und des Fahrerverhaltens abgeleitet. Kooperative Manöver mit *Opel Core* beinhalten Verzögern, Beschleunigen und Fahrstreifenwechsel, sowie unterstützen kaskadierte (d. h. mehrere aufeinanderfolgende) Koordinierungsprozesse. Vergleichbar mit dem IMAGinE 2018 Ansatz kann eine Trajektorie in *Opel Core* zu einem der drei verschiedenen Typen in Abhängigkeit von den damit symbolisierten Intentionen gehören. Diese Trajektorientypen sind:

- Reference – standard, wenn keine Kooperation aktiv
- Request – Kooperation anfragen (ohne Vorfahrt)
- Offer – Kooperation anbieten (mit Vorfahrt)

Falls ein nicht-kommunikationsfähiges Fahrzeug, das dementsprechend keine Trajektorien übertragen kann, in einer kooperativen Situation vorhanden ist, so muss eine Most Probable Trajectory (MPT) geschätzt (z. B. anhand von Fahrdynamik) und als Ersatz für seine Reference-Trajektorie benutzt werden. Das Prinzip der kooperativen Manöverabstimmung mit *Opel Core* Algorithmus ist in der nachfolgenden Illustration eines exemplarischen Szenarios des kooperativen Einfädelns an Anschlussstellen (Funktion F1) gezeigt.

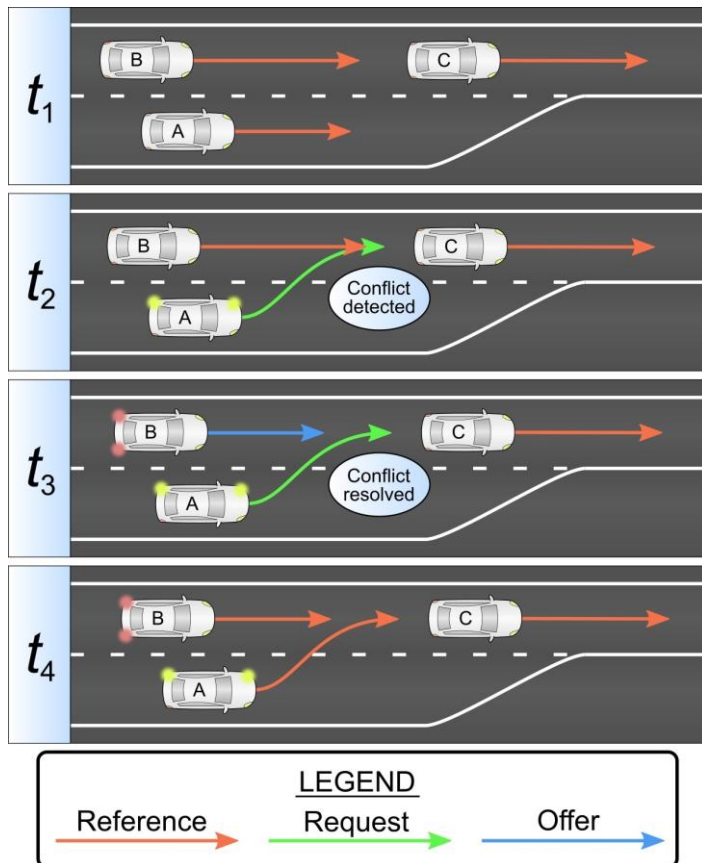


Abbildung 14: Konzept der kooperativen Manöverabstimmung – OpelCore 2018/19 [1]

Wie hier zu sehen, folgen zum Zeitpunkt t_1 alle Fahrzeuge zunächst ihren ursprünglichen Reference-Trajektorien ohne Konflikte. Zum Zeitpunkt t_2 , sobald Fahrzeug A einen Fahrstreifenwechsel beabsichtigt, versendet es eine Request-Trajektorie, die einen Konflikt mit der Reference-Trajektorie des Fahrzeugs B verursacht. Dabei kann Fahrzeug B auf seine Vorfahrt verzichten und durch Verzögern kooperieren, um die für den Fahrstreifenwechsel des Fahrzeugs A notwendige Lücke zum Fahrzeug C zu vergrößern. Zum Zeitpunkt t_3 , nachdem Fahrzeug B kooperativ seine Trajektorie angepasst und als Offer-Trajektorie versendet hat, ist der Konflikt gelöst. Zum Zeitpunkt t_4 kann Fahrzeug A seiner neuen Reference-Trajektorie folgen und einfädeln.

Opel Core Algorithmus wird in jedem Fahrzeug, das aktiv an der Kooperation teilnimmt, unabhängig ausgeführt. Dies resultiert in einem kontinuierlichen und dezentralen Prozess des Verhandels und der Entscheidungsfindung, sodass jedes Fahrzeug autonom, zugleich kooperativ oder nicht-kooperativ, seine Handlungsweise basierend auf seinem eigenen Manöverplaner und den Informationen aus der V2X-Kommunikation bestimmen kann.

3.4.2 Weitere Verfahren

3.4.2.1 AltTraj 2018 – Kooperation durch alternative Trajektorien

Bei diesem Verfahren plant jedes Fahrzeug jeweils eine ideale und eine sog. Zöger-Trajektorie, die über V2X-Kommunikation ausgetauscht werden. Die Zöger-Trajektorie folgt demselben Pfad wie die ideale, ist aber mit einem langsameren Geschwindigkeitsprofil versehen und deswegen bei dem gleichen zeitlichen Planungshorizont räumlich kürzer. Im Normalfall wird die ideale Trajektorie gefahren. In einer kooperativen Verkehrssituation, falls ideale Trajektorien von mehreren Fahrzeugen einen Konflikt verursachen, wird anhand eines numerisch-kombinatorischen Regelwerks die Lösung gefunden (global), bei der die Mehrheit der Fahrzeuge ihre idealen Trajektorien abfahren können. Die Minderheit der Fahrzeuge fährt somit ihre Zöger-Trajektorien ab, wodurch der Konflikt kooperativ gelöst wird. Das Konzept der Kooperation durch alternative Trajektorien ist anhand einer Kreuzung in der nachfolgenden Abbildung demonstriert.

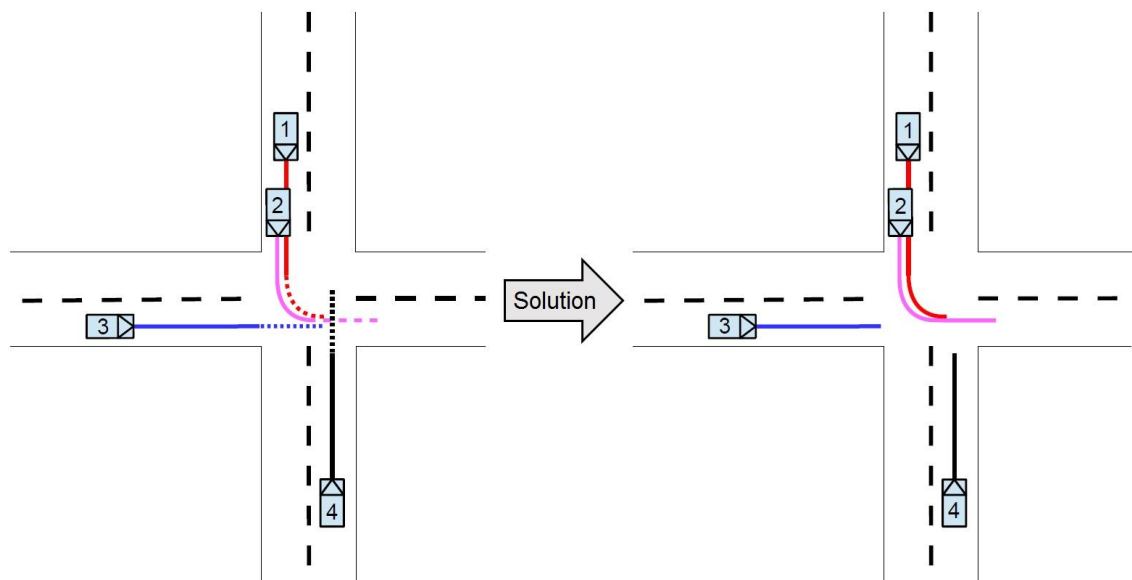


Abbildung 15: Konzept der kooperativen Manöverabstimmung – AltTraj 2018

Wie hier gezeigt, kollidieren zunächst die idealen Trajektorien der Fahrzeuge 1, 2, 3 und 4 alle auf der Kreuzung. Eine Lösung dieses Konflikts wird dadurch erreicht, dass Fahrzeuge 1 und 2 ihren idealen Trajektorien (längere Linien) sowie Fahrzeuge 3 und 4 ihren Zöger-Trajektorien (kürzere Linien) folgen.

3.4.2.2 Targets 2019 – Kooperation durch Ziele

Bei diesem Verfahren plant jedes Fahrzeug jeweils ein langfristiges Ziel (ein Ort), einige mittelfristige Ziele (Straßen) und mehrere kurzfristige Ziele (Positionen), die alle über V2X-Kommunikation ausgetauscht werden. Dabei werden zunächst die mittelfristigen Ziele aus dem langfristigen Ziel, sowie die kurzfristigen Ziele aus den entsprechenden mittelfristigen Zielen intern im Fahrzeug basierend auf seiner geplanten Route generiert. Sobald das eigene Fahrzeug Ziele von anderen Fahrzeugen empfängt, modelliert es ihre zukünftige Bewegung beispielsweise in Form

von Trajektorien, wobei diese Modellierung mit einer zunehmenden Entfernung immer unpräziser wird. Falls dabei ein Konflikt erkannt wird, suchen die Fahrzeuge nach einer kooperativen Lösung. Dafür wird in jedem Fahrzeug eine übergreifende Kostenfunktion ausgewertet, mit der ein Optimum gefunden wird (global). Das Konzept der Kooperation durch Ziele ist anhand einer einfachen und einer mehrfachen Gabelung in der nachfolgenden Abbildung demonstriert.

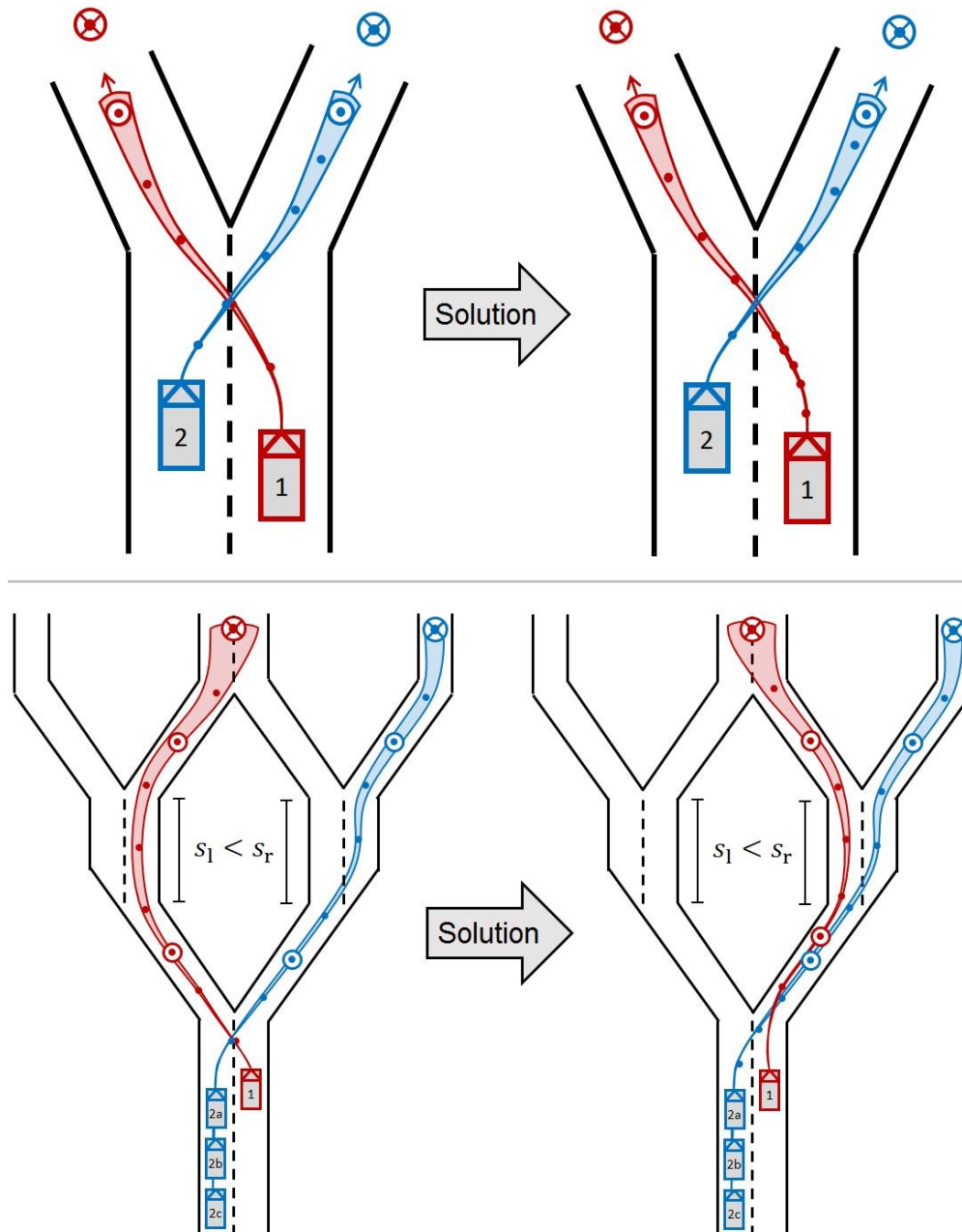


Abbildung 16: Konzept der kooperativen Manöverabstimmung – Targets 2019

Diese Abbildung stellt die Kooperation anhand von langfristigen (große Kreise), mittelfristigen (mittlere Kreise) und kurzfristigen (kleine Kreise) Zielen dar. Wie im oberen Teil gezeigt, haben Fahrzeuge 1 und 2 einen Konflikt, der durch die Anpassung der kurzfristigen Ziele gelöst wird, indem Fahrzeug 1 langsamer und Fahrzeug 2 schneller die Gabelung passieren. Wie im unteren

Teil gezeigt, haben Fahrzeuge 1 sowie 2a, 2b und 2c einen Konflikt, der durch die Anpassung der mittelfristigen und kurzfristigen Ziele gelöst wird, indem Fahrzeug 1 seine Route auf die (etwas längere) rechte Straße umplant, um die Kolonne von Fahrzeugen 2a, 2b und 2c nicht zu behindern.

3.4.2.2.1 Quellen

[1] V. Lizenberg, D. Bischoff, Y. Haridy, U. Eberle, S. Knapp & F. Köster. "Simulation-Based Evaluation of Cooperative Maneuver Coordination and its Impact on Traffic Quality". *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*; vol. 3, no. 6, pp. 3159-3169; Technical Paper 2021-01-0171. 2021; doi: [10.4271/2021-01-0171](https://doi.org/10.4271/2021-01-0171).

3.5 Konzeptvorstellung BMW

3.5.1 Manöverabstimmungskonzept „Bbasic“

Das Konzept wurde in IMAGinE von BMW entwickelt.

Im „Bbasic“ Konzept werden keine Bewegungsbereiche / Trajektorien verwendet. Damit wird der Bandbreitenbedarf für die Kommunikation auf einen Bruchteil der für die Übermittlung einer oder mehrerer geplanter Trajektorien benötigten Bandbreite reduziert.

Ferner braucht in diesem Verfahren die MCM ereignisorientiert nur dann ausgetauscht werden, wenn Kooperationsbedarf gesehen wird. Die Kommunikation erfordert somit insgesamt minimale Bandbreite.

Die Abstimmung orientiert sich an der Abstimmung menschlicher Fahrer und eignet sich für den Mischverkehr mit manuell gesteuerten Fahrzeugen, da es ohne die im Mischverkehr schwierige und unsichere Prädiktion von Bezugstrajektorien auskommen kann. Die Kommunikation mit manuell oder assistiert gesteuerten Fahrzeugen kann mit diesem Verfahren ohne Bezugstrajektorien dennoch eindeutig erfolgen.

Somit handelt es sich also in der oben beschriebenen Ausprägung um ein explizites, ereignisorientiertes, dezentrales, intentionsbasiertes Abstimmungsverfahren. Kooperationsrelevante Intentionen werden durch die direkte, eindeutige Mitteilung eines Bedarfs auf einen Zielfahrstreifen mitgeteilt. Optional werden auch die gewünschten Kooperationspartner direkt benannt. Weitere Varianten sind unten beschrieben.

Das Verfahren ermöglicht eine zielgerichtete Adressierung von Nachrichten an genau den oder die Verkehrsteilnehmer, die um eine Kooperation gebeten werden, oder denen die eigene Kooperationsbereitschaft mitgeteilt wird. Beispielsweise können für die IMAGinE-Funktion F1 ein einzelnes, alle, oder alle rückwärtigen Fahrzeuge selektiv adressiert und um Kooperation gebeten werden.

Das Verfahren kann auch als interoperable Rückfallebene für andere Manöverabstimmungskonzepte genutzt werden. Der zur Diskussion gestellte Vorschlag ist auch, dass Fahrzeuge nicht zum

Austausch von MCM zwingend verpflichtet sind, auch wenn dieser bei gegebener technischer Möglichkeit im Fahrzeug im Regelfall sozial wünschenswert erscheint.

3.5.2 Manöverabstimmungskonzept „BBB“

Das Konzept nutzt jenseits von Trajektorien flächige Bewegungsbereiche. Es kann ebenfalls ereignisorientiert aktiviert und deaktiviert werden, aber auch permanent aktiviert sein (siehe "Bbasic").

3.6 Konzeptvorstellung Mercedes-Benz AG/DCAITI

Das Manöverabstimmungskonzept von Mercedes-Benz und dem DCAITI sieht vor, kooperative Fahrfunktionen durch die Verhandlung von Rollen zu realisieren. Gründe hierfür sind bspw. längerfristige, d. h. taktische und strategische, Manöverabstimmungen, welche mit einem Trajektorienansatz nur schwierig aufgrund der V2X-Kanallastkapazitäten realisiert werden können. Diese Funktionen können beispielsweise das Fahren in einem Platoon (kooperative Längsführung) oder das Überholen von Lastkraftwagen auf der Autobahn sein. Des Weiteren lässt sich das rollenbasierte Konzept auf andere kooperative Funktionen, wie bspw. das Einfädeln an Anschlussstellen übertragen. Die Grundidee bei diesem Konzept beruht auf verteilten, synchronen Zustandsautomaten. Nachfolgende Abbildung zeigt den Zustandsautomat exemplarisch für die Funktion F2 – Platooning.

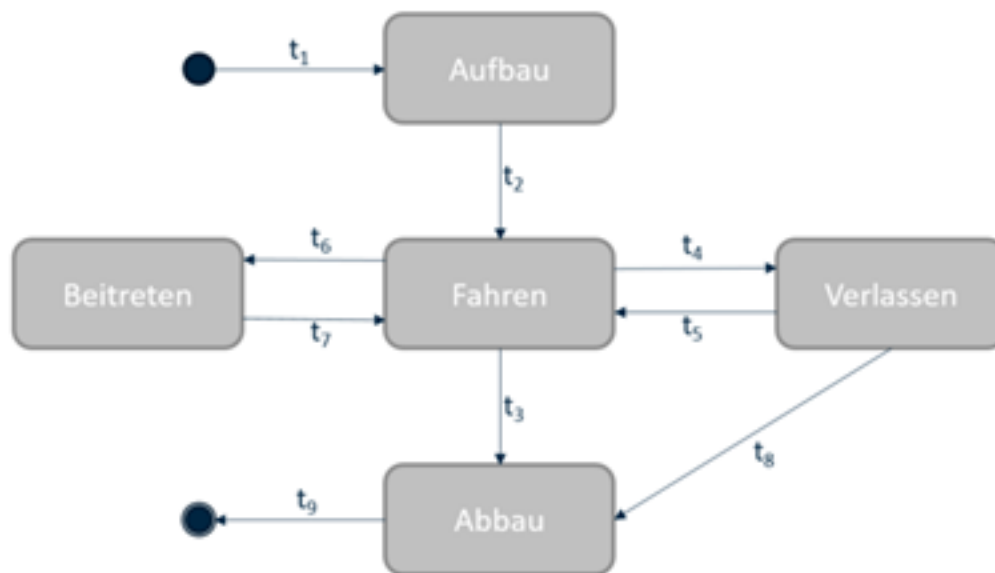


Abbildung 17: Zustandsautomat Funktion F2

Dieses Konzept sieht eine explizite Manöverdurchführung vor – die Manöverabstimmung erfolgt durch die verhandelte Rolle. Jedes Fahrzeug führt das Manöver dann anhand der Implementierung dieser Rolle durch. Die Abstimmung erfolgt über das Collaborative Maneuver Protocol (CMP).¹

Die nachfolgende Abbildung zeigt das rollenbasierte Konzept im Platoon-State „Beitreten“. Fahrzeug 3 hat die Absicht, in das Platoon einzutreten. Durch eine Kooperationsanfrage von Fahrzeug 3 wird ein Abstimmungsprozess eingeleitet. Wird von den anderen Fahrzeugen dem Wunsch zugestimmt, wechseln die Fahrzeuge in den Platoon-State „Beitreten“. Das Fahrzeug 2 leitet aus diesem State-Machine-State durch seine Rolle ab, dass es eine Lücke für Fahrzeug 3 aufmachen soll. Somit passt Fahrzeug 2, wie abgebildet, seine Trajektorie an. Nachdem Fahrzeug 3 im Platoon eingetreten ist, werden alle Teilnehmer wieder in den State „Fahren“ wechseln.

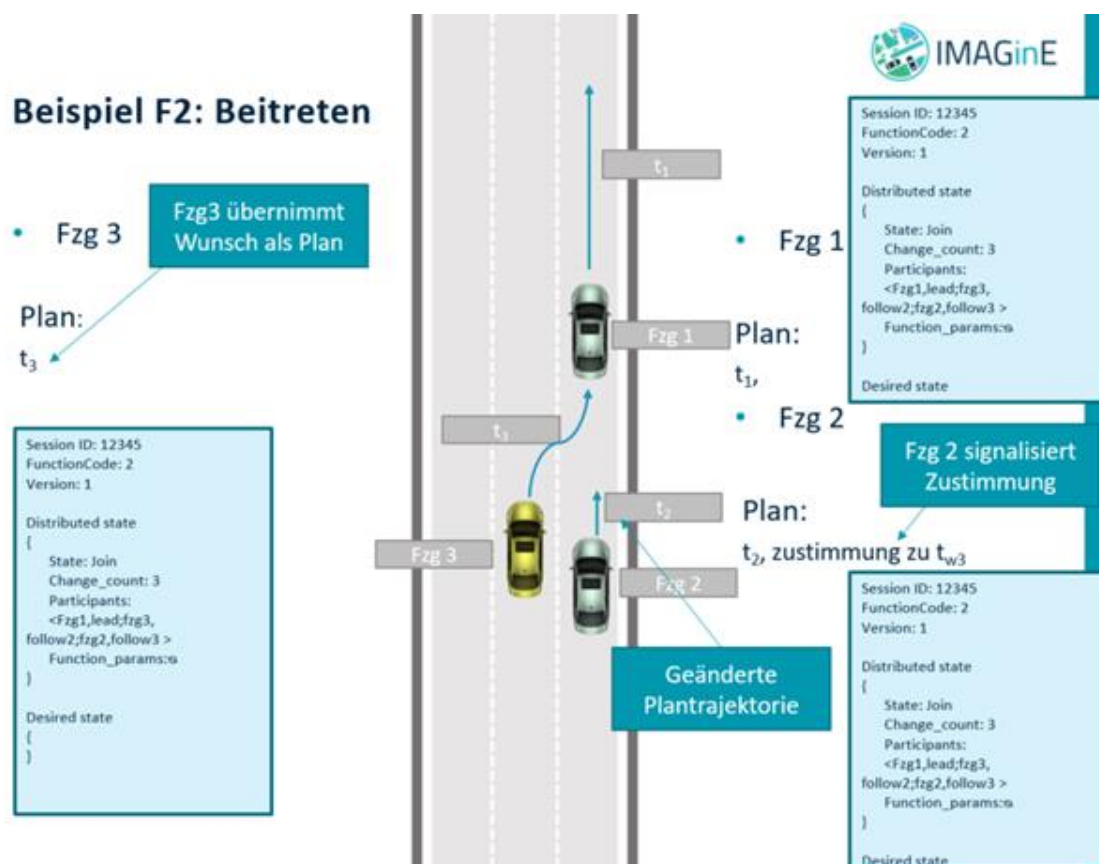


Abbildung 18: Rollenbasiertes Konzept im Platoon-State „Beitreten“

Der Wechsel von einem Zustand in einen anderen erfolgt durch einen Abstimmungsmechanismus. Das Fahrzeug, das den Zustandswechsel auslösen möchte, schickt eine Request-Nachricht. Die anderen Fahrzeuge können diesem Wechsel zustimmen, ablehnen oder mit einem anderen Vorschlag antworten. Alle Nachrichten sind mit einem Zeitstempel, eineindeutiger ID und einer Liste der Teilnehmer der Kooperations-Session versehen. Erst wenn alle Fahrzeuge zugestimmt

¹ Sawade, Oliver, Matthias Schulze, and Ilja Radusch. "Robust communication for cooperative driving maneuvers." *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 10.3 (2018): 159-169.

haben, wird ein Wechsel in den Folgezustand verzogen. Durch Kontrollnachrichten wird garantiert, dass sich alle Fahrzeuge immer im gleichen Zustand des verteilten Zustandsautomaten befinden.

3.7 Konzeptvorstellung MAN – Kooperative Längsführung (F2)

Im Folgendem wird das Konzept beschrieben, welches auf der Dissertation von Jürgen Hauenstein beruht. Die Grundidee wurde dabei bereits in [1] veröffentlicht. Zudem wurde eine Veröffentlichung mit dem Konzept beim MDPI-Journal Electronics eingereicht.

3.7.1 Motivation

Kraftstoffkosten sind einer der größten Kostenanteile bei den Total Cost of Ownership bei Speditionen im Fernverkehr [2, 3], weshalb die kooperative Längsführung neben der Manöverabstimmung auch das energieeffiziente Fahren abbilden muss. Hierfür ist insbesondere das Darstellen von Ausrollvorgängen ein entscheidender Faktor, wie es bei GPS-unterstützten Tempomaten z. B. Efficient Cruise bei MAN [4] in der Serie bereits eingesetzt wird. Aufgrund der hohen Masse von schweren Nutzfahrzeugen können Ausrollvorgänge sich über mehrere Kilometer erstrecken. Dies übersteigt in der Regel den Planungshorizont der Manöverabstimmung von z.B. Einfädeln auf Autobahnen (Funktion 1), weshalb eine zusätzliche Ebene im Form einer strategischen Trajektorie im Konzept notwendig ist.

3.7.2 Konzept

3.7.2.1 Konzeptübersicht

Die Manöverabstimmung mit anderen Verkehrsteilnehmern erfolgt mit dem Konzept des Austausches von Plan- und Wunschtrajektorie über V2X [5]. Die Plantrajektorie wird immer versendet und stellt den aktuellen Fahrplan nach den Straßenregeln dar. Die Plantrajektorien sind mit anderen Plantrajektorien kollisionsfrei. Die Wunschtrajektorie wird ausgesendet, wenn eine gewünschte Trajektorie nach der Straßenverkehrsordnung nicht gefahren werden kann, sie ist mit mindestens einer Plantrajektorie von einem anderen Verkehrsteilnehmer kollisionsbehaftet. Vorteil des Verfahrens ist u. a. der mit maximal zwei Trajektorien relativ geringe Ressourcenverbrauch beim Kommunikationskanal. Zudem stellt dies ein generisches Verfahren dar, weshalb keine Situationsanalyse notwendig ist. Abweichend vom [Kooperationskonzept IMAGinE 2018 \(D2.5\)](#) werden Trajektorien nicht im Freenet-, sondern in UTM-Format ausgetauscht.

Trajektorienformat (google protobuf message definition der Maneuver Coordination Message MCM):

```

syntax = "proto3";

message MCM {
  uint32 v2xId = 1; // V2X station ID
  int64 timestamp = 2; // time in us
  Trajectory planTra = 3; // planned trajectory
  optional Trajectory desireTra = 4; // desired trajectory

  message Trajectory {
    repeated PolySection longPos = 1; // UTM-easting
    repeated PolySection latPos = 2; // UTM-northing

    message PolySection {
      repeated float coefficients = 1; // coefficients of polynomial a_0,
      a_1, ...
      float start = 2; // start time in s, first section start always with
      zero, real time = timestamp + start
      float end = 3; // end time in s
      float xOffset = 4; // UTM-Offset, whole number (accuracy float32 8-9
      numbers)
    }
  }
}

```

Berechnung von Positionen:

$$x(t) = a_0 + xOffset + a_1 * t + a_2 * t^2 + a_3 * t^3 + ?$$

Mit $t = [start, end]$ und x der entsprechenden UTM-Koordinate.

Anmerkung zum definierten Trajektorienformat:

Die float32 Werte müssen in float64 konvertiert werden, ansonsten ist die Genauigkeit in UTM nicht ausreichend.

Weiter wird davon ausgegangen, dass sich die Fahrzeuge in der gleichen UTM-Zone bewegen, ansonsten müsste noch ein zusätzliches Feld für die UTM-Zone in der Message-Definition eingeführt werden und ggf. Trajektorien von einer Zone in die andere konvertiert werden.

Eine weitere Einschränkung ist, dass UTM nicht beispielsweise die Pole der Welt abdecken, jedoch werden hiermit weitestgehend alle Straßen der Welt erfasst.

Beim definierten Format wird versucht, möglichst wenig Speicherplatz zu belegen, um die Kanallast gering zu halten. Aus diesem Grund muss z. B. das Heading aus der Trajektorie mit der Annahme, dass sich das Fahrzeug entlang der Trajektorie orientiert, berechnet werden. Für stehende Objekte muss das Heading entweder aus der Cooperative Awareness Message (CAM) [6] oder der eigenen Messung von der Boardsensorik entnommen werden oder mit weiteren Annahmen, wie z. B. das Fahrzeug ist entlang der Fahrspur orientiert, geschätzt werden. Zudem enthält die Trajektorie keine Höhendaten. Die Höhe kann bei Kollisionsprüfung von Trajektorien bei z. B. Unterführungen oder Brücken entscheidend sein. Hier muss wiederum mit den Daten von der

CAM oder der Bordsensorik und ggf. eines Straßenmodells entschieden werden, ob Fahrzeuge sich auf der gleichen Straße bzw. Spur befinden.

Der Planungshorizont aufgrund der begrenzten Rechenkapazität ist relativ klein, z. B. 10 Sekunden. Bei einer Fahrt mit 80 km/h beträgt hiermit der Planungshorizont ca. 222 m und ist damit für das energieeffiziente Fahren zu gering.

Die strategische Trajektorie stellt die optimale Fahrstrategie mit langem Horizont, z. B. 3 km, ohne Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer auf Fahrspur Mitte dar. Sie ist eine zusätzliche Komponente. Mit dieser werden lange Rollmanöver, die über den Horizont der Plan- und Wunschtrajektorie hinausgehen, realisiert. In der Regel wird die strategische Trajektorie abgefahren, wenn keine Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern stattfindet, damit ist das Verhalten von GPS-Tempomaten abgebildet.

3.7.2.2 Detailbeschreibung

Die folgende Abbildung zeigt eine vereinfachte Übersicht über einzelne Komponenten.

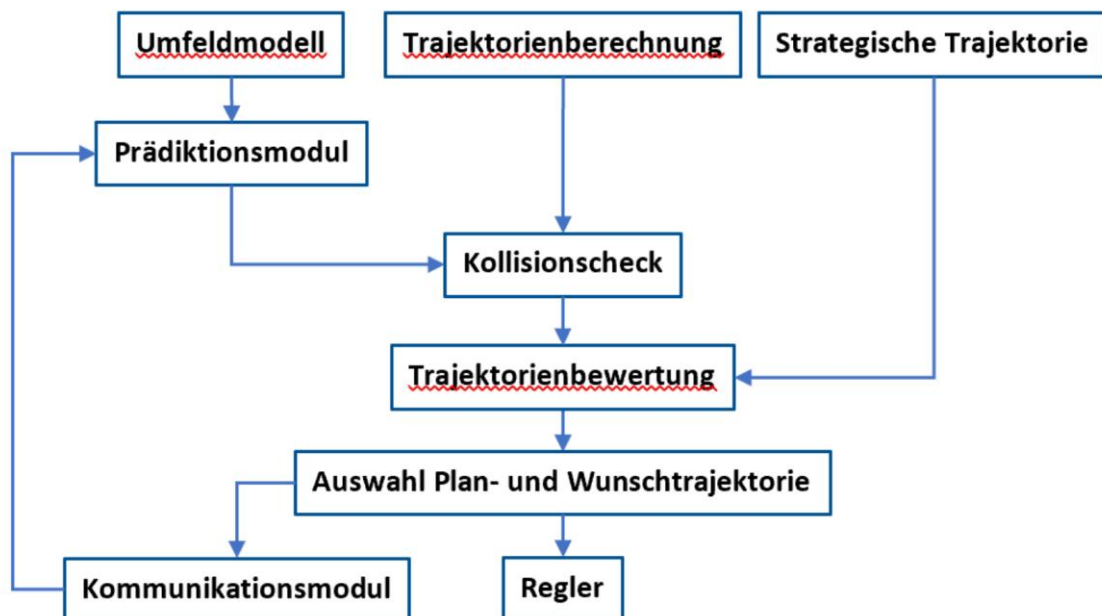


Abbildung 19: Vereinfachte Komponentenübersicht der kooperativen Längsführung für Nutzfahrzeuge

Im ersten Schritt wird eine strategische Trajektorie berechnet. Es finden sich in der Literatur verschiedene Konzepte wie GPS-Tempomaten umgesetzt werden können, z. B. [7–11]. Dies wird auch als Eco-Driving oder Look-Ahead-Control bezeichnet. Wichtig hierbei ist, dass eine Trajektorie ständig ausgegeben wird. Für die Umsetzung wurde ein Heuristik-Verfahren gewählt, u. a. wegen der geringen benötigten Rechenkapazität.

Zudem wird für die Auswahl der Trajektorien für die kooperative Manöverabstimmung eine Trajektorienschar berechnet. Die Trajektorien sollten dabei energieeffiziente Trajektorien mit

Rollmanöver beinhalten und physikalisch fahrbar sein. Für die Längsführung kann von Fahren entlang eines vorgegebenen Pfades bzw. Fahrspur Mitte ausgegangen werden. Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Berechnung von Trajektorien, beispielsweise wird in [12] eine Übersicht gegeben. Unter anderem wegen der physikalischen Fahrbarkeit wurde in der Implementierung eine graphenbasierte Trajektorienberechnung eingesetzt.

Die Trajektorien werden anschließend auf Kollision mit anderen Trajektorien von anderen Verkehrsteilnehmern verglichen. Die Objekte werden von einem Umfeldmodell bereitgestellt. Trajektorien von Nicht-V2X-Fahrzeugen werden geschätzt. Dabei wird angenommen, dass diese sich entlang der Fahrspur bewegen. Trajektorien von V2X-Fahrzeugen werden von der MCM übernommen und den entsprechenden Objekten zugeordnet.

- Beim Kollisionscheck wird das Einhalten des Sicherheitsabstandes nach Straßenverkehrsordnung (StVO) geprüft. Aufgrund von Ungenauigkeiten von z. B. der Messdatenerfassung bzw. Ermittlung der Position oder des Abfahrens der Trajektorie, wird ein mehrstufiger Kollisionscheck durchgeführt. Die Trajektorien werden mit Toleranzen belegt. Wird beim Abfahren der Trajektorie diese überschritten, erfolgt ein Reset auf die aktuelle Position, ansonsten werden Trajektorien immer vom geplanten Punkt der letzten Plantrajektorie zum gegebenen Zeitpunkt weiter berechnet. Dies bedeutet, dass der tatsächliche Abstand um das Zweifache der Toleranz bei Trajektorien abweichen kann und bei ungünstigen Resets dieser sich sprunghaft verändert. Zudem kann es durch numerische Ungenauigkeiten in der Berechnung von einem Berechnungszyklus zu einem anderen Berechnungszyklus zu einem veränderten Abstandsmaß kommen, d. h. bei einem Sicherheitsabstand von z. B. 50 m ändert sich der berechnete Abstand von beispielsweise 50,000 000 000 1 m auf 49,999 999 999 8 m. Ist dies der Anfangsabstand, sind in diesem Beispiel keine Berechnung von kollisionsfreien Trajektorien möglich. Aus diesen Gründen gibt es drei Kollisionsprüfungen mit verschiedenen Abständen:

- Stufe 1: Sicherheitsabstand nach StVO + Toleranzen der Trajektorien
- Stufe 2: Sicherheitsabstand nach StVO in ersten z.B. 3 Sekunden, ansonsten wie Stufe 1.
- Stufe 3: Sicherheitsabstand nach StVO

In der Regel werden nur Trajektorien ausgewählt, die der Stufe 1 entsprechen. Im Fall, dass keine kollisionsfreien Trajektorien in allen drei Stufen gefunden werden, wird ein Notfallmanöver in Form einer Bremsung eingeleitet.

Anschließend wird eine Bewertung der Trajektorien durchgeführt. Durch den Vergleich der Geschwindigkeitsprofile der strategischen und der berechneten kurzen Trajektorien für V2X können sinnvolle Rollvorgänge mit langem Planungshorizont erkannt und ausgeführt werden. Dies stellt eine Kostenfunktion dar. Damit wird auch sichergestellt, dass sich Fahrzeuge bei freier Fahrt mit einer angemessenen Geschwindigkeit fortbewegen. Darüber hinaus wird die Energieeffizienz und das Erfüllen von Wünschen in der Kostenberechnung mit einbezogen. Die fahrbare Trajektorie mit den geringsten Kosten wird als Plantrajektorie gesetzt. Ist eine andere Trajekto-

rie deutlich kostengünstiger, dann wird diese zudem als Wunschtrajektorie gesetzt. Des Weiteren werden akzeptierte Wünsche gespeichert und im nächsten Schritt wie eine Plantrajektorie behandelt, auch wenn nach StVO dieses Fahrzeug bzw. diese Fahrzeuge nicht vorfahrtsberechtigt sind.

Im letzten Schritt werden die Trajektorien über das Kommunikationsmodul versendet und die Plantrajektorie an den Regler übergeben, damit diese abgefahren wird. Für die Übertragung mit V2X müssen, je nach Berechnungsverfahren der Trajektorien, diese in Polynome umgewandelt werden.

Die gesamte Berechnung der Rechenschritte erfolgt zyklisch und ist nicht eventbasiert.

3.7.3 Quellen

- [1] J. Hauenstein and F. Diermeyer, "Cooperative Longitudinal Control for Commercial Vehicles," in *9. Tagung Automatisiertes Fahren*, Munich, 2019.
- [2] G. Nowak, J. Maluck, C. Stürmer, and J. Pasemann, *The era of digitized trucking: Transforming the logistics value chain*. [Online]. Available: <https://www.strategyand.pwc.com/?/media/file/The-era-of-digitized-trucking.pdf> (accessed: Jun. 23 2019).
- [3] T. Esch and U. Dahlhaus, "Antrieb," in *ATZ / MTZ-Fachbuch, Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, E. Hepke and S. Breuer, Eds., 8th ed., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, pp. 403–540.
- [4] MAN Truck & Bus AG, *MAN EfficientCruise® - GPS-gesteuerter Tempomat | MAN Lkw*. [Online]. Available: <https://www.truck.man.eu/?/de/de/man-welt/technologie-und-kompetenz/effizienzsysteme/gps-gestuetzter-tempomat/GPS-gestuetzter-Tempomat.html> (accessed: Aug. 23 2017).
- [5] B. Lehmann, H.-J. Gunther, and L. Wolf, "A Generic Approach towards Maneuver Coordination for Automated Vehicles," in *IEEE ITSC 2018: 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) Maui, Hawaii, USA, November 4-7, 2018*, Maui, Hawaii, USA, 2018, pp. 3333–3339.
- [6] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, ETSI EN 302 637-2, European Telecommunications Standards Institute, Nov. 2014. [Online]. Available: <http://www.etsi.org>
- [7] B. Saerens, "Optimal Control Based Eco-Driving: Theoretical Approach and Practical Applications," Dissertation, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium, 2012. Accessed: Sep. 22 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/243463882_Optimal_Control_Based_Eco-Driving

- [8] M. Huber, "Verfahren zum Betreiben eines Fahrzeuges, insbesondere eines Nutzfahrzeuges, Steuer- und/oder Auswerteeinrichtung, Fahrerassistenzsystem für ein Nutzfahrzeug sowie Nutzfahrzeug," DE102008023135B4, Deutschland, Nov 12, 2009.
- [9] T. Radke, "Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien," Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2013.
- [10] A. Sciarretta and A. Vahidi, *Energy-Efficient Driving of Road Vehicles*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020.
- [11] E. Hellström, *Look-ahead control of heavy vehicles*. Linköping: Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2010. Accessed: Mar. 28 2019. [Online]. Available: http://www.vehicular.isy.liu.se/?en/Publications/PhD/10_PhD_1315_EH.pdf
- [12] D. Gonzalez, J. Perez, V. Milanés, and F. Nashashibi, "A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 1135–1145, 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2498841.

3.8 Konzeptvorstellung MAN – Kooperative Lkw-Überholmanöver

Im Folgendem wird das Konzept beschrieben, welches auf der Dissertation von Jan Cedric Mertens beruht.

3.8.1 Motivation

Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn werden von Pkw-Fahrern oft als Hindernis betrachtet. Damit sind jedoch nicht die vielen schnellen Lkw-Überholmanöver gemeint, die Dank aufmerksamer Lkw-Fahrer unbemerkt vollzogen werden, sondern die so genannten „Elefantenrennen“. Dabei überholt ein Lkw einen anderen Lkw mit einer so geringen Differenzgeschwindigkeit, dass die Überholdauer mehr als 45 s beträgt und somit eine, nach dem OLG Hamm, unzulässige Behinderung des rückwärtigen Verkehrs entsteht.

Lkw-Überholmanöver an sich gehören allerdings zu einem gesunden Verkehrsfluss, da sie eine zu starke Clusterbildung auf der rechten Spur verhindern und den Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Spuren angleichen. Ein allgemeines Lkw-Überholverbot würde also dem Verkehrsfluss schaden.

Wenn also Lkw-Überholmanöver nicht verboten werden können, so soll überlegt werden, wie sie durch Kooperation optimiert werden können. Das primäre Ziel dabei ist, die Sicherheit und Effizienz zu erhöhen, zusätzlich soll aber auch der Lkw-Fahrer entlastet und auf eine Kooperation zwischen zukünftigen automatisierten Fahrzeugen hingearbeitet werden.



Abbildung 20: Elefantenrennen blockiert die Überholspur

3.8.2 Ausgangssituation

Die Ausgangssituation für das Lkw-Überholmanöver ist in Abbildung 21 dargestellt. Ein schneller Lkw1 befindet sich hinter einem langsamer fahrenden Lkw2, während sich von hinten schnell Pkw nähern. In dieser Situation ist zu entscheiden, ob und wie ein Überholmanöver durchgeführt werden soll, indem die potenziellen Kosten für alle Beteiligten untereinander abgewogen werden.

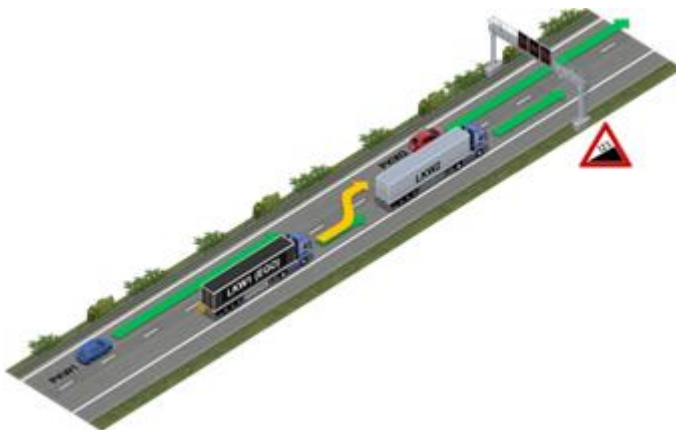


Abbildung 21: Ausgangssituation für das Lkw Überholmanöver (Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

3.8.3 Optimierungsansatz

Für das kooperative Lkw-Überholmanöver gibt es drei Ansätze:

- Reduzierter Sicherheitsabstand: Durch die Reduktion des Sicherheitsabstandes von 50 m auf einen Platooning-Abstand wird die relative Überholdistanz und damit die Überholdauer reduziert. Während dieser Ansatz in der Praxis häufig auch durch Lkw-Fahrer angewandt wird, ist es ohne V2X extrem gefährlich und kann zu Auffahrunfällen führen. Während des

reduzierten Sicherheitsabstandes müssen also Bremssignale vom vorderen Lkw an den hinteren Lkw übertragen werden.

- Wahl der Überholstelle: Lkw fahren durch den dynamischen GPS-Tempomaten meist nicht eine konstante Geschwindigkeit, sondern passen diese kontinuierlich an die Topologie an. So kann bspw. mit einer geringeren Geschwindigkeit über die Kuppe eines Berges gerollt werden, um im Gefälle wieder zu beschleunigen. Die Wahl der Geschwindigkeit hängt stark von den Einstellungen des Fahrers, aber auch der Beladung und der Motorisierung ab. Da also die Geschwindigkeitsprofile der Lkw dynamisch sind, kann auch die Differenzgeschwindigkeit der Lkw über die kommende Strecke variieren. Durch ein Übereinanderlegen der geplanten Geschwindigkeitsprofile über die kommenden Kilometer können also Abschnitte identifiziert werden, auf denen die Differenzgeschwindigkeit besonders groß ist.
- Anpassen der Geschwindigkeit: Um die Differenzgeschwindigkeit weiter zu erhöhen, können die Geschwindigkeiten der Lkw während des Überholmanövers auch noch aktiv, innerhalb eines Kooperationspielraums, angepasst werden. Dies führt zu einer verringerten Überholdauer und damit zu weniger Behinderung für den Pkw-Verkehr.

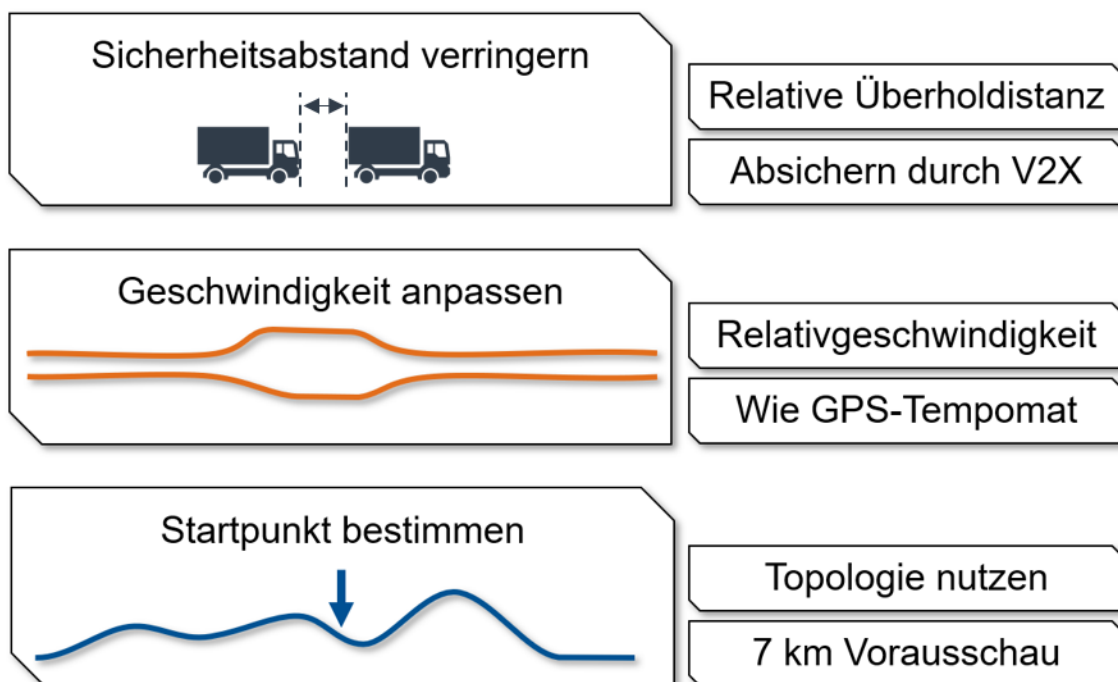


Abbildung 22: Drei Ansätze für die Optimierung der kooperativen Lkw-Überholmanöver

3.8.4 Manöverplanung

Die Manöverplanung für das kooperative Lkw-Überholmanöver findet auf einer strategischen Ebene statt und generiert dabei keine Trajektorien, sondern Handlungsempfehlungen für den Lkw-Fahrer über ein HMI.

Ausgehend von den Geschwindigkeitsprofilen der GPS-Tempomaten wird zuerst die Stelle identifiziert, an der der schnelle Lkw den langsamen Lkw einholt. Dies ist die erstmögliche Überholstelle. Von dort an werden für die kommenden maximal 7 km in 10-Meter-Abschnitten wie folgt Überholmanöver generiert und in einer Liste gespeichert:

- Bestimmen, wie stark der schnelle Lkw seine Geschwindigkeit reduzieren muss, um den langsamen Lkw erst an späteren Überholstelle einzuholen
- Basierend auf den Geschwindigkeiten beider Lkw an der Überholstelle den benötigten Sicherheitsabstand bestimmen: $\text{Reaktionsweg_schnellerLkw} + \text{Bremsweg_schnellerLkw} - \text{Bremsweg_langsamerLkw}$
- Beim Erreichen des reduzierten Sicherheitsabstandes den Spurwechsel einleiten
- Der schnelle Lkw schöpft durch Beschleunigen sein Kooperationspotenzial voll aus.
- Der langsame Lkw schöpft durch Ausrollen sein Kooperationspotenzial voll aus.
- Basierend auf den Geschwindigkeiten beider Lkw wird der nötige Sicherheitsabstand für das Wiedereinscheren bestimmt (analog zu 2).
- Beim Erreichen des reduzierten Sicherheitsabstandes den Spurwechsel zurück einleiten.
- Der schnelle Lkw rollt auf seine ursprüngliche Wunschgeschwindigkeit aus.
- Der langsame Lkw beschleunigt auf seine ursprüngliche Wunschgeschwindigkeit.

Anschließend wird die erstellte Liste an Überholmanövern durchgegangen und die einzelnen Überholmanöver werden auf Basis des benötigten Kraftstoffs und der benötigten Zeit der beteiligten Lkw und Pkw monetär bewertet. Das Überholmanöver mit den geringsten Kosten wird im Folgenden für die Manöverabstimmung verwendet.

3.8.5 Manöverabstimmung

Die Manöverabstimmung basiert auf dem Konzept von Oliver Sawade mit verteilten Zustandsautomaten (siehe auch [Konzeptvorstellung Mercedes-Benz AG/DCAITI](#)). Das kooperative Lkw-Überholmanöver wird dafür in mehrere Zustände aufgeteilt. In jedem Zustand gibt es atomare Manöverpläne für den schnellen Lkw und den langsamen Lkw, wie bspw. „Beschleunige auf dein volles Kooperationspotenzial“. Diese Zustände bilden einen verteilten Zustandsautomaten mit Bedingungen für Zustandsübergänge wie bspw. „Ist der reduzierte Sicherheitsabstand erreicht, wechsele in Zustand ‚Spurwechsel nach links‘“.

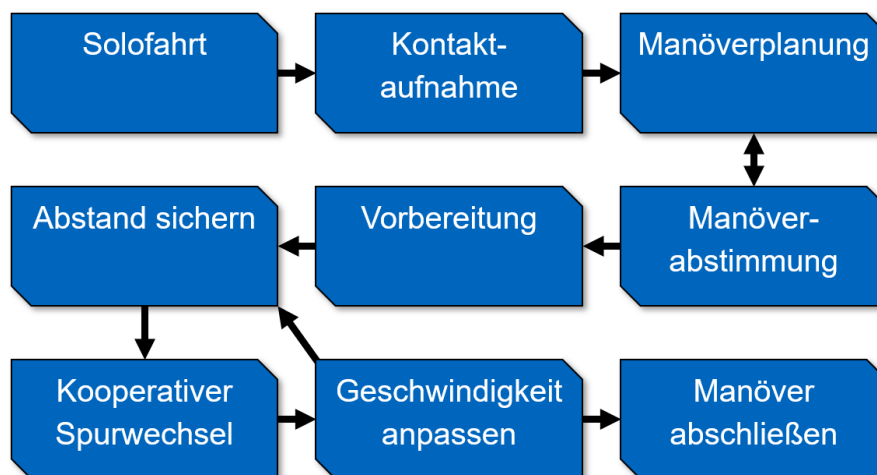


Abbildung 23: Verteilter Zustandsautomat für das kooperative Lkw-Überholmanöver

Eine wesentliche Eigenschaft von diesem Konzept ist außerdem, dass Zustandsübergänge nur synchron zwischen den Lkw durchgeführt werden können, wofür eine neue Nachricht, die IDSM, eingeführt wurde. Der Aufbau der IMAGinE Driving Strategy Message (IDSM) ist generisch, so dass sie allgemein für strategische Abstimmungen über verteilte Zustandsautomaten verwendet werden kann, und ist in der Abbildung dargestellt. Das erste Element ist der Header gefolgt von den eigentlichen fahrstrategischen Inhalten. Mit „Nature“ lässt sich festlegen, welche funktions-spezifische Manöverplanung derzeit aktiv ist und welcher verteilte Zustandsautomat verwendet werden soll. Anschließend folgen eine notwendige „Current Session“ und eine optionale „Desired Session“. Beide enthalten eine „State ID“, um zu übermitteln, in welchem Zustand des verteilten Zustandsautomaten sich das Fahrzeug aktuell befindet, oder in welchen Zustand es wechseln möchte. Dazu gehört jeweils eine „Payload“, die die gesamte Parametrisierung des verteilten Zustandsautomaten enthält. Im Falle der „Desired Session“ ist auch ein „Vote Timeout“ enthalten, das vorgibt, wie lange der Wunsch gültig ist. Ein weiterer Teil der Session ist eine Liste mit den aktuellen oder gewünschten Teilnehmern, in Form einer eindeutigen Teilnehmer-ID und einer Rollenzuordnung. Um weitere teilnehmerspezifische Informationen auszutauschen, die nicht bereits über die CAM oder die DENM abgedeckt sind, kann eine „Participant Payload“ mit-versendet werden. Da diese Payload für beide Sessions gilt, wird sie nur in der „Current Session“ versendet. Mit dem „Current State“ versenden die beteiligten Fahrzeuge stetig, in welchem Zustand sie sich derzeit befinden. Wenn in diesem Zustand die Bedingung für einen Zustandswechsel erfüllt ist, so versendet das Fahrzeug zusätzlich den „Desired State“ über die IDSM. Erst wenn alle beteiligten Fahrzeuge den identischen „Desired State“ versenden, wird der Zustandswechsel synchron durchgeführt.

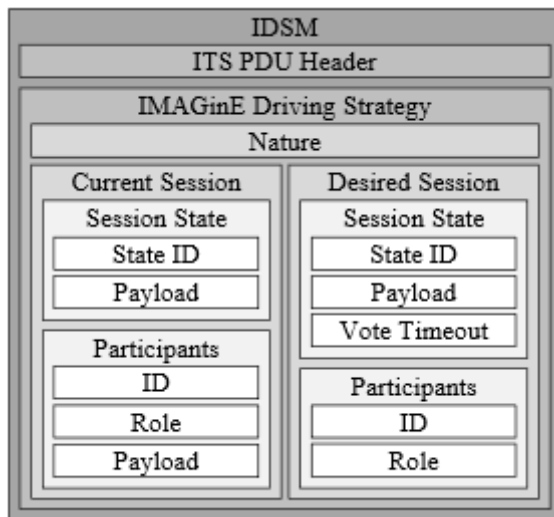


Abbildung 24: Beschreibung des Generischen Teils der IDSM

Neben dem generischen Teil der IDSM müssen spezifisch für das kooperative Lkw-Überholmanöver weitere Inhalte definiert werden: Die „Session Payload“ und die „Participant Payload“, wie sie in Abbildung 25 dargestellt sind. Innerhalb der IDSM sind diese als optionale Bytearrays definiert und erst durch den Verweis auf die kooperative Funktion aus dem „Nature“ Attribut kann die passende Deserialisierung ausgewählt werden. Alle für die Manöverplanung nötigen Parameter werden in der „Participant Payload“ abgebildet. Das geplante Manöver lässt sich auf der strategischen Ebene anschließend eindeutig durch die sechs Elemente der „Session Payload“ beschreiben. Wenn also die „Session Payload“, welche durch die beiden Lkw unabhängig bestimmt wurde, bis auf kleine Abweichungen übereinstimmt, kann angenommen werden, dass beide Lkw das identische Manöver durchführen wollen. Die Elemente der „Session Payload“ werden dann verwendet, um den verteilten Zustandsautomaten zu parametrisieren.

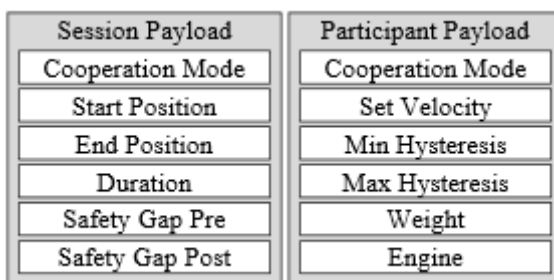


Abbildung 25: Beschreibung des funktionsspezifischen Teils der IDSM

3.9 Konzeptvorstellung Autobahn GmbH

Im Folgenden wird das Konzept der kooperativ-strategischen Verkehrsverteilung (F4) der Autobahn GmbH vorgestellt.

3.9.1 Motivation

Bislang werden Navigation und Routenempfehlungen unabhängig vom Medium, wie z. B. Navigationssystemen im Fahrzeug oder infrastrukturseitigen dynamischen Wegweisern, nur auf Grundlage von Reisezeitverlusten und Streckenlängen ermittelt. Außerdem ist eine Integration lokal kollektiver, strategischer Routenempfehlungen von der individuellen Navigation unabhängig, so dass diese sich im ungünstigsten Fall widersprechen. Somit ist auch eine optimierte Verkehrsverteilung im verfügbaren Straßennetz unter Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitäten bisher nicht möglich.

Das Ziel der Funktion „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“ ist eine Optimierung der Verkehrsverteilung durch Berücksichtigung kollektiver Strategien und individueller kooperativer Abstimmung auf Basis und Nutzung weiterer Kriterien zur Wahl der Route.

3.9.2 Konzept



Abbildung 26: Situation in Funktion F4: Entscheidungspunkt. (Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

Die Manöverplanung für die kooperativ-strategische Verkehrsverteilung findet auf einer strategischen Ebene statt und generiert dabei keine Trajektorien, sondern Handlungsempfehlungen für die Fahrer über ein HMI. Im Rahmen der Funktion „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“ versenden Fahrzeuge Informationen zur Ermittlung von Kenngrößen auf Haupt- und Alternativrouten an einen strategischen Support. Dieser auf einem Server realisierte strategische Support (auch Support Server oder kurz "SUPS" genannt) kann z. B. durch eine kooperative Verkehrszentrale abgedeckt werden. Dieser ermittelt eine optimierte Verteilung der Verkehrsströme unter Berücksichtigung strategischer Routenführungen auf Basis der fusionierten Fahrzeug- und Infrastrukturdaten und sendet die Verteilungsempfehlung ins Fahrzeug. Die Fahrzeuge empfangen die Daten und stimmen diese vor den entsprechenden Entscheidungspunkten auf ihrer Route mit ihren Intentionen bzgl. Ziel und Routenkriterien untereinander ab. Daraufhin

berechnet der strategische Support die nutzer- und kollektivoptimierten Routen. Ein solcher Entscheidungspunkt, bei dem die Wahl zwischen einer mit Stau belasteten Hauptroute und einer Alternativroute besteht, ist in Abbildung 26 zu sehen. Das Konzept der Funktion F4 kann in sechs wesentliche Schritte aufgeteilt werden:

Routenwahlkriterien wählen und festlegen

Die Wahl und Festlegung der Routenwahlkriterien erfolgt teilweise manuell und unabhängig vom Funktionsbetrieb bereits vor Beginn der Fahrt und teilweise durch eine Ermittlung von Routenkriterien, die von Fahrerverhalten und Fahrzeugstatus abhängen, im Betrieb mit bordeigener Sensorik.

Neben den bisher üblichen Kriterien zur Wahl einer Route, wie Reisezeit oder Streckenlänge, können weitere Routenkriterien auch im Hinblick auf die Entwicklungen zum automatisierten Fahren mit einbezogen werden. Hierbei kann zwischen Routenkriterien, die der Fahrer manuell wählt, und Routenkriterien, die durch das Fahrzeug unter Berücksichtigung des Fahrerverhaltens und des Fahrzeugstatus ermittelt werden, unterschieden werden.

Neben den klassischen Routenkriterien aus Ziel, Reisezeit, Streckenlänge und ggf. Vermeidung von gebührenpflichtigen Strecken sind auch weitere fahrerseitige Routenkriterien möglich. Im Hinblick auf die Möglichkeit, dass beim automatisierten Fahren anderen Tätigkeiten nachgegangen werden kann, wie z. B. arbeiten, werden Kriterien, wie gleichmäßiges, ruhiges oder verbrauchsarmes Fahren wichtig. Je nach Zweck der Fahrt kann aber auch der Wunsch nach einer abwechslungsreichen und schönen Umgebung oder auch einer an die Fahraufgabe anspruchsvollen Fahrtstrecke ein Kriterium sein. Die zu Beginn der Fahrt wählbaren, fahrerseitigen Routenkriterien sind in Abbildung 27 zu sehen.

Bitte bewerten Sie Ihre zu berücksichtigenden Kriterien von gering (grün) bis hoch (rot)!

☒	Verbrauchsarmes Fahren	
☒	Kurze Reisezeit	
☒	Anspruchsvolle Fahraufgabe	
☐	Sightseeing	

Abbildung 27: Fahrerseitige Routenkriterien

Aufgrund der steigenden Intelligenz und Sensorik im Fahrzeug sind auch Kriterien von Relevanz, die das Fahrzeug ermittelt. Die GPS-Position des Fahrzeugs wird mit der hinterlegten Karte verglichen. Auf diese Weise wird erkannt, auf welchem Fahrstreifen sich das Fahrzeug befindet. Ist ein Wechsel auf die Alternativroute mit mehreren Fahrstreifenwechseln verbunden, erhöht dies die Kosten für die Wahl der Alternativroute. Des Weiteren ist der Fahrzeugtyp oder Zweck für eine Routenwahl von Bedeutung. So sind beispielsweise nicht alle möglichen Routen auch für Schwerlastverkehr befahrbar. Darüber hinaus ist im Fall eines Linienbusses die Routenwahl in-

folge der vorgegebenen Haltepunkte eingeschränkt, so dass häufig nur sehr bedingt auf Ausweichstrecken ausgewichen werden kann. Ein weiteres Kriterium ist der Fahrzeugstatus, so dass z.B. bei geringem Tankfüllstand die Routenauswahl auf Strecken, welche eine Tankstelle beinhalten, beschränkt werden kann.

Fahrdaten liefern (Sensierung)

Im zweiten Schritt übermitteln die Fahrzeuge Daten an den strategischen Support, die zur Generierung einer Verkehrslage dienlich sind. Hierbei handelt es sich um die Position, die Bewegungsrichtung, sowie die Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Die Übertragung dieser Daten erfolgt von den Fahrzeugen zunächst per WLAN nach ETSI ITS G5 Standard an eine Intelligent Roadside Station (IRS). Bereits vorhandene IRS können für diesen Zweck genutzt werden, eine zukünftige Verteilung im Straßennetz an strategisch wichtigen Punkten ist im Rahmen der Digitalisierung der Infrastruktur vorgesehen. Die IRS senden die Daten per Mobilfunk weiter an den SUPS. Die Fahrdaten werden als Cooperative Awareness Message (CAM) übermittelt. Abbildung 28 zeigt die beschriebene Nachrichtenübertragung zwischen SUPS, IRS und den Fahrzeugen.

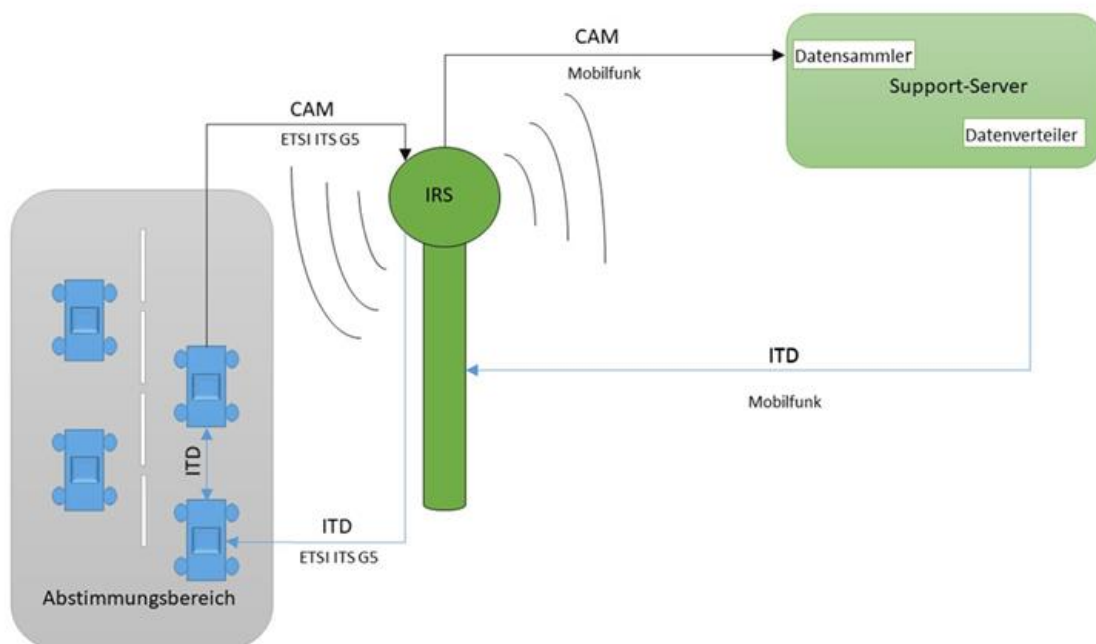


Abbildung 28: Nachrichtenübertragung zwischen Fahrzeugen, IRS und SUPS

Verkehrslage und Strategien ermitteln

Verkehrslageermittlung und Strategiefindung werden auf dem SUPS durchgeführt. Zur Verkehrslageermittlung werden zum einen die von den Fahrzeugen übermittelten Daten verwendet, zum anderen kann über eine Schnittstelle zur Verkehrszentrale Deutschland auf die vorliegenden Daten, wie z. B. Baustellen, Verkehrseignisse oder Veranstaltungen zurückgegriffen

werden. Die Daten dieser beiden Quellen können zu einem gemeinsamen Modell der Verkehrslage fusioniert werden, so dass Aussagen über die Belastungen und Restkapazitäten auf den Routen getroffen werden können.

Aus der Verkehrslage wird eine optimierte Verteilung des Verkehrs auf die Routenmöglichkeiten berechnet, so dass Verkehrsstörungen vermieden und verfügbare Kapazitäten auf Autobahnen und Basisnetz ausgenutzt werden. Hierbei liegt die Priorität auf der Ausnutzung der Kapazität auf den entsprechend übergeordneten Straßen.

Die Verkehrsverteilung wird auf Basis der Ausstattungsrate am Entscheidungspunkt, welcher einen wichtigen Einfluss hat, modifiziert. Das Verhältnis zwischen ausgestatteten und nicht ausgestatteten Fahrzeugen wird auf Basis der infrastrukturdetektierten Verkehrsstärke im Verhältnis zu der Anzahl der fahrzeugseitig detektierten Verkehrsstärke ermittelt.

Eine gewisse Validierung dieses Konzepts erfolgt zusammen mit den Untersuchungen zu den Auswirkungen auf den Gesamtverkehr im Rahmen von Arbeitspaket AP5.3. Dies wird durch die Entwicklung eines makroskopischen Verkehrsmodells vorgenommen, das eine sorgfältige Erzeugung des Verkehrsaufkommens und die Erstellung eines Netzes umfasst, um eine möglichst realistische Situation auf deutschen Autobahnen abzubilden. Die detailliertere Beschreibung hierzu wird in Deliverable D5.3 aufgeführt.

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten im Projekt IMAGinE wird der Schritt "Umfeldmodellierung" für die Umsetzung auf dem Testgelände entsprechend skaliert. Auf dem Testgelände bestehen die Aufgaben des SUPS im Wesentlichen aus der Generierung und Versendung der Verteilungsempfehlung (siehe Abschnitt "Manöverplanung") sowie der Visualisierung der Positionen und Manöver der Fahrzeuge.

Attribute für Handlungsrichtlinien und eine Verteilungsempfehlung übermitteln (Manöverplanung)

Die optimierte Verteilung des Verkehrs für einen bestimmten Entscheidungspunkt wird „Verteilungsempfehlung“ genannt. Unter der Voraussetzung, dass Kapazitätsengpässe vorliegen oder nahen, wird die Verteilungsempfehlung an die Fahrzeuge übermittelt. Der Nachrichtentyp der Verteilungsempfehlung ist die „IMAGinE Traffic Distribution“ (ITD). Wie in Abbildung 28 gezeigt, wird diese Nachricht vom SUPS per Mobilfunk an die IRS gesendet und anschließend per ETSI ITS G5 an die Fahrzeuge. Innerhalb der ITD existieren zwei verschiedene Arten von Informationen, genannt Container: der Versand der Verteilungsempfehlung erfolgt über den sogenannten TrafficDistribution Container, die im nächsten Abschnitt beschriebene Abstimmung der Routenwahl erfolgt über den Score Container. Abbildung 29 zeigt die Struktur der ITD sowie die Inhalte der beiden Container.

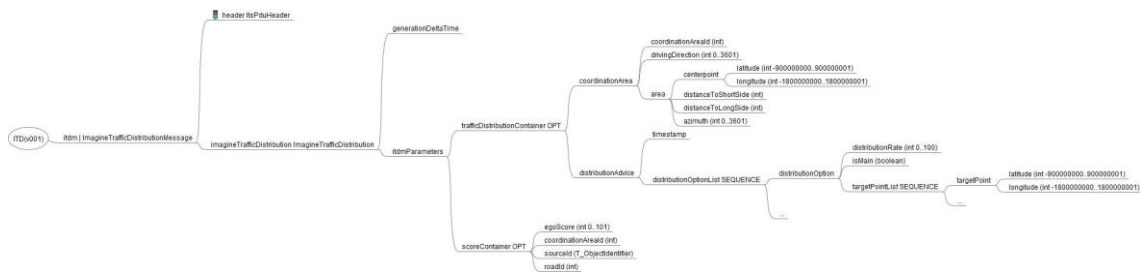


Abbildung 29: Struktur des Nachrichtenformates ITD

Routenwahl kommunizieren und abstimmen (Manöverabstimmung)

Im fünften Schritt erfolgt zwischen den beteiligten Fahrzeugen eine Abstimmung über die Verteilung auf die Routenalternativen. Die Absicht zur Wahl einer Route erfolgt auf Basis eines Scores, der anhand einer Gewichtung der unterschiedlichen Kriterien berechnet wird. Alle unter "Routenwahlkriterien wählen und festlegen" genannten Kriterien (auch Parameter genannt) fließen in die Berechnung des Scores mit ein. Ihr Einfluss auf den Score ist jedoch unterschiedlich und wird mit der Gewichtung festgelegt. Der Score drückt somit die Routenpräferenz aus.

Vor jedem Entscheidungspunkt, an dem die Wahl zwischen der Hauptroute und einer Alternativroute besteht, befindet sich der Abstimmungsbereich (siehe Abbildung 30). Jedes Fahrzeug teilt den anderen Fahrzeugen im Abstimmungsbereich seine auf dem Score basierende Manöverabsicht mit, die im Fall eines einzelnen Entscheidungspunktes "Abfahren" oder "auf der Hauptroute bleiben" heißt. Dies geschieht permanent, solange sich das Fahrzeug im Abstimmungsbereich befindet. Gleichzeitig empfängt jedes Fahrzeug die geplanten Manöver der umliegenden Fahrzeuge und prüft, ob die Summe der geplanten Absichten mit der Verteilungsempfehlung übereinstimmen. Bei Abweichungen werden zuerst die Fahrzeuge mit der geringsten Präferenz für die Route, die zu viele Fahrzeuge gewählt haben, das veränderte Manöver wählen und die anderen Fahrzeuge darüber informieren. Die Entscheidung zwischen Wechsel auf die Alternativroute und Bleiben auf der Hauptroute wird letztendlich bei Verlassen des Abstimmungsbereichs getroffen.

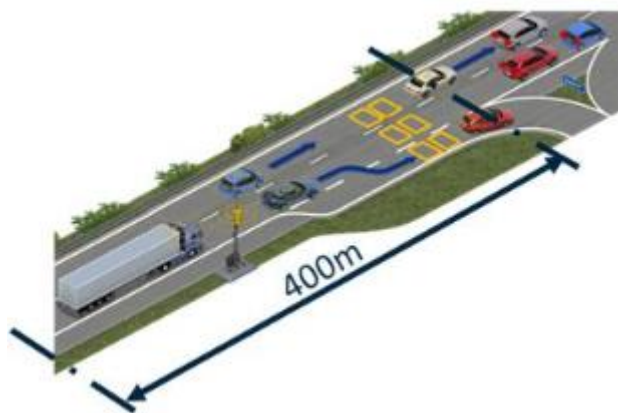


Abbildung 30: Abstimmungsbereich

Manöver durchführen (Manöverdurchführung)

Der Fahrerin oder dem Fahrer wird die Manöverempfehlung über das HMI des Fahrzeugs mitgeteilt (z.B. „auf der Hauptroute bleiben“). Das Ergebnis der Manöverdurchführung, also ob die Manöverempfehlung befolgt wurde oder nicht, wird implizit per CAM über die IRS an den SUPS zurückgemeldet. Diese Information wird dann in den folgenden, kontinuierlichen Berechnungsprozessen berücksichtigt.

4 ERGEBNISSE AUS DER KONZEPTVERIFIKATION

4.1 Konzeptverifikation Continental

Continental beschäftigte sich mit dem Kooperationskonzept IMAGinE 2018, das dem GUA1 zu Grunde liegt. Das Testsystem nutzte die Implementierung des GUA1 als Basis, die durch umfangreiche eigene Weiterentwicklungen in die Lage versetzt wurde, die gewünschten Szenarien und Untersuchungsgegenstände realisieren zu können.

Der entstandene Manöverplaner ist dadurch gekennzeichnet, dass er weitgehend zustandslos ist und daher so gut wie keine Historie für laufende Kooperationen aufweist. Insofern ähnelt er dem Kooperationskonzept, welches in seiner Reinform ebenfalls ohne Historie konzipiert ist.

Die Länge der erzeugten Trajektorien ist sowohl in zeitlicher als auch in räumlicher Hinsicht variabel und hängt von der jeweiligen Situation, bzw. die Nähe zu potenziellen Zonen, bei denen Kooperation auftreten könnte, ab. Dies bedeutet, dass bei einer Folgefahrt auf Autobahnen oder Landstraßen der Planungshorizont für Trajektorien z. B. bei ca. 10sec liegt. Er wird bei Annäherung an potenzielle Konfliktzonen wie zum Beispiel Autobahnauffahrten oder Kreuzungen auf bis zu 30sec erhöht. Eine Erhöhung des Planungshorizontes ermöglicht es, frühzeitiger eine eventuelle Kooperation zu beginnen, was für alle Beteiligten zu besseren Ergebnissen führt. Gerade bei vollen Straßen besteht oft die einzige Möglichkeit eine Kooperationsanfrage zu gewähren darin, durch Verzögern etwas später in der Konfliktzone einzutreffen, so dass der Anfragende entsprechend Zeit bekommt sein Manöver durchzuführen. Um zum Beispiel eine Sekunde später an einem bestimmten Ort einzutreffen, muss bei einer Vorausschau von 10sec die Geschwindigkeit weitaus mehr reduziert werden, als wenn dafür 15sec Zeit zur Verfügung stehen. Auf der anderen Seite können in einem längeren Horizont mehr Störungen auftreten, die es verhindern, die ursprünglich geplanten Trajektorien umzusetzen. Dadurch, dass gemäß Kooperationskonzept permanent Trajektorien ausgetauscht werden, kann aber auf solche Störungen reagiert werden.

Die unterschiedliche Länge von erzeugten Trajektorien führt zu dem beachtenswerten Effekt, dass nachrangige Fahrzeuge, z. B. Einfädler auf Autobahnen, anfangs scheinbar konfliktfrei auf die Autobahn fahren und später dann doch noch eine Kooperation eingehen müssen. Falls z. B. ein potentieller Kooperationspartner auf der Hauptfahrbahn einer Autobahn seine Trajektorie nur bis zur Mitte einer Auffahrt geplant hat, dann kann ein Einfädler konfliktfrei eine Trajektorie planen, die am Ende der Auffahrt auf die Hauptfahrbahn wechselt (Optisch sieht es aus, als würde der Einfädler um die Trajektorie des anderen "herum planen"),. Erst wenn die Trajektorie des späteren Partners so lang ist, dass kein freier Manöverraum übrigbleibt, kommt es zur Kooperation. Dieser Effekt wird u.a. im nächsten Abschnitt gezeigt. Er hat i .d. R. keine Auswirkung auf das für die Insassen spürbare Fahrzeugverhalten.

4.1.1 Ablauf einer Kooperation am Beispiel eines Linksabbiegerszenarios mit dem implementierten Manöverplaner

Continental hat das Konzept vorrangig anhand eines Linksabbiegerszenarios auf Landstraßen verifiziert. An einer einfachen Ausprägung soll gezeigt werden, wie das Konzept in der Praxis arbeitet. Es sind drei Fahrzeuge beteiligt: Das rote Fahrzeug R möchte nach links auf die Hauptstraße abbiegen, die beiden Fahrzeuge blau B und grün G fahren geradeaus. Die Konstellation wurde so gewählt, dass, wenn jedes Fahrzeug seine Wunschgeschwindigkeit fahren würde, es zu einer sehr zu engen Annäherung von grün und rot kommen würde. Es gibt drei theoretische Lösungsmöglichkeiten für die Situation: Rot fährt vor Grün über die Kreuzung, zwischen blau und grün oder hinter den beiden.

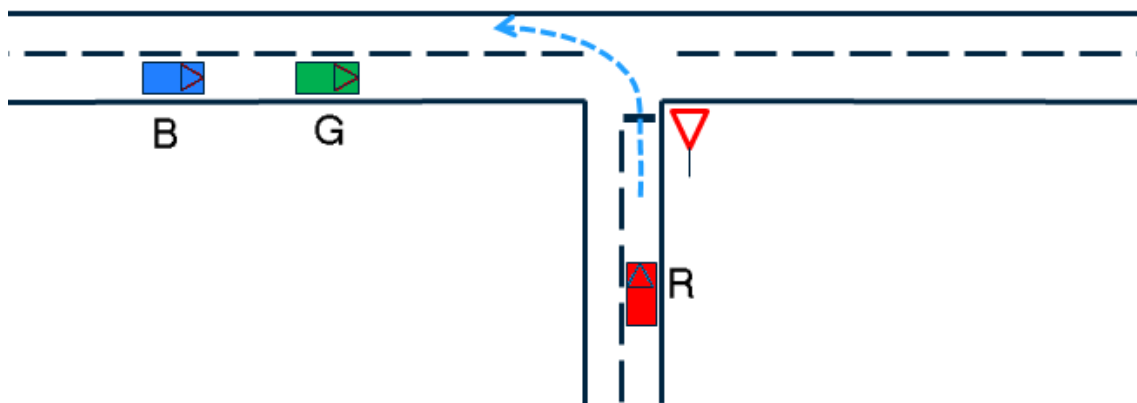


Abbildung 31: Bild des Szenarios F5.3b: Linksabbieger auf Landstraßen

Die Diagramme in der folgenden Abbildung zeigen verschiedene Kennwerte im Laufe des kombinierten Manövers. Es enthält folgende Daten:

- **Velocity:** Dies zeigt den Geschwindigkeitsverlauf der drei Fahrzeuge. Die Farbgebung ist von den drei beteiligten Fahrzeugen abgeleitet. Zu den kräftigen Grundfarben, die die angeforderte Geschwindigkeit der Trajektorien widerspiegeln, gibt es noch etwas dünnere Linien, die die vom Fahrregler umgesetzte und real gefahrene Geschwindigkeit wiedergeben. Bei einem perfekten Regler wären diese deckungsgleich. Da das implementierte System nur ein Prototyp ist, sind Manöverplanung und Trajektorienregelung noch nicht in allen Fällen gut aufeinander eingestellt.
- **Requested Trajectory:** Hier wird die Anzahl von versendeten Bedarfstrajektorien (von R) und die Anzahl versendeter Alternativtrajektorien (von B und G) dargestellt.
- **Cooperation Acceptance:** Gibt an, ob B und G das von R gewünschte Fahrmanöver annehmen oder nicht. Der Wert 1 bedeutet, dass sie die Anforderung annehmen, doch dafür nicht von ihrem egoistischen Ziel abweichen müssen, z. B. weil R weit vor oder hinter dem eigenen Fahrzeug die Kreuzung quert. Der Wert 2 bedeutet, dass sie die Anforderung annehmen und zur Erfüllung von ihren egoistischen Zielen teilweise abweichen müssen - also in diesem Szenario die Geschwindigkeit etwas verringern müssen. Hierbei ist wichtig zu wissen, dass

der implementierte Manöverplaner jegliche Trajektorien von nachrangigen Fahrzeug intern als Bedarfstrajektorien interpretiert (R ist gegenüber B und G wartepflichtig und somit nachrangig.). Da B und G meist irgendeine Trajektorie von R - also auch eine Trajektorie mit Stillstandsphase - erfüllen, haben sie also i. d. R. mindestens den Wert 1. Somit ist hier im Wesentlichen der Wert 2 von Interesse, da er eine aktive Kooperation anzeigt.

- **Costs:** Dieses Diagramm zeigt die Mehrkosten, die bei B und G entstehen, um einen Wunsch von R zu erfüllen. Die magenta-farbene Linie ist die eingestellte Grenze, die über die Annahme einer Anforderung entscheidet.

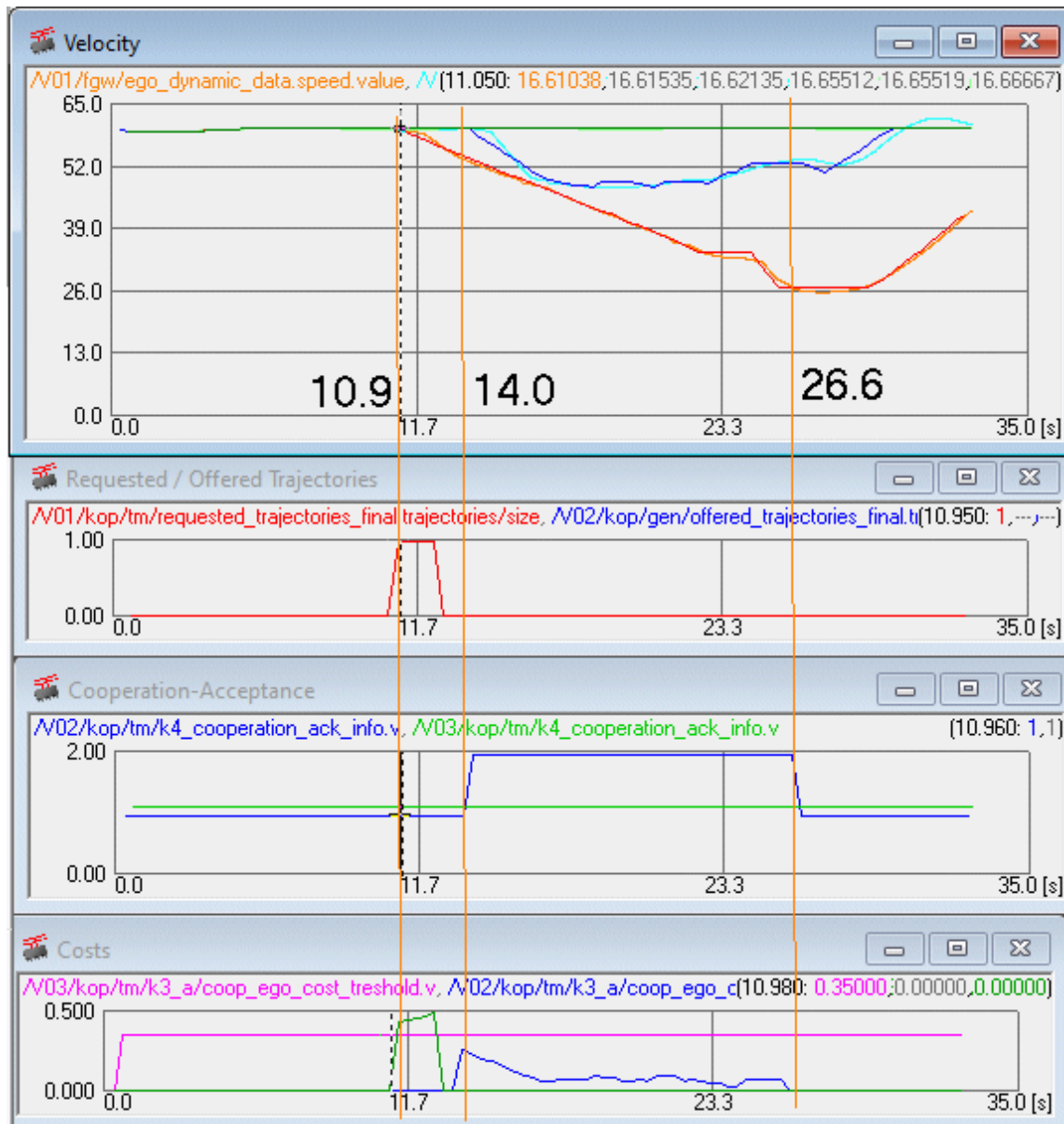


Abbildung 32: Messung F5_Scenario3b_V02_Accept_without_Drv_2021-11-11-14-53-20_ok.bag resultierend aus CarMaker Simulation von F5-Scenraio 3b, Testrun "V02 AcceptWithoutDrv"

Der Manöverablauf sieht nun folgendermaßen aus:

Zuerst fahren die Fahrzeuge unbeeinflusst voneinander auf die Kreuzung zu. Die Referenzgeschwindigkeit (=SetSpeed) ist bei allen 60kmh. Zum Zeitpunkt $t=10.9\text{sec}$ erkennt R, dass es auf eine Kreuzung zufährt und die empfangenen Trajektorien der Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn die gewünschte Trajektorie nicht mehr ermöglichen. Es sendet eine Bedarfstrajektorie, um den eigenen Bedarf zur Verbesserung der Situation zu verdeutlichen. Es werden die Trajektorien aus der folgenden Abbildung versendet. Es enthält für alle Fahrzeuge farblich gekennzeichnet die Bezugstrajektorien. Für das Fahrzeug R sind hier zwei Trajektorien dargestellt. Die rote zeigt die

Bedarfstrajektorie und die magenta-farbene die Bezugstrajektorie, die das Fahrzeug bislang gezwungen ist zu fahren. Die Bedarfstrajektorie würde es ermöglichen, die Kreuzung mehrere Sekunden früher zu überqueren. Man kann erkennen, dass die blaue Bedarfstrajektorie von B deutlich kürzer ist als die der anderen, weil B die Kreuzung für sich noch nicht als potenzielle Konfliktzone eingeschätzt hat.

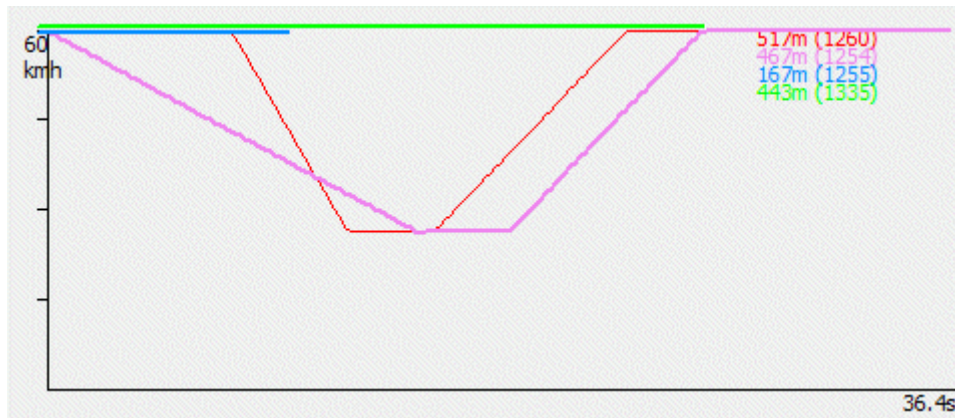


Abbildung 33: Geschwindigkeitsverlauf der Trajektorien zum Zeitpunkt $t=10.9s$

Fahrzeug G empfängt die Bedarfstrajektorie und berechnet intern, welche Kosten entstehen würden, um sie zu erfüllen. Wie das Diagramm *costs* zeigt, liegen diese Kosten allerdings über der festgelegten Schwelle. Somit lehnt G die Erfüllung dieses Bedarfs ab und bleibt entsprechend bei seiner bisherigen Bezugstrajektorie.

Fahrzeug R kann folglich seinen Bedarf nicht umsetzen und ist gezwungen hinter G die Kreuzung zu queren. Da es nicht weiß, ob die anderen Fahrzeuge seine Bedarfstrajektorien empfangen und darauf reagiert haben, sendet es eine zeitlang die Bedarfstrajektorie. Nach ca. 1.7sec nimmt der implementierte Manöverplaner von R an, dass G nicht bereit ist, das gewünschte Manöver zu ermöglichen und stellt das Versenden weiterer Bedarfstrajektorien ein.

Zum Zeitpunkt $t=14.0sec$ erkennt auch B die potenzielle Konfliktzone und sein Manöverplaner erweitert seinen Trajektorienhorizont bis zur Kreuzung. Dabei stellt es fest, dass die Bezugstrajektorie von R seine eigenen egoistischen Absichten verhindert - die Trajektorien würden sich schneiden. Es entsteht ein Konflikt. Die gemäß des Kooperationskonzeptes vorgesehene Lösungsmöglichkeit wäre, die konfliktbehaftete Bezugstrajektorie mit dem Wissen um den eigenen Vorrang gemäß StVO dennoch zu verschicken. Somit würde der erkannte Konflikt nach außen getragen. R müsste darauf reagieren und seine Bezugstrajektorie anpassen und stattdessen eine Bedarfstrajektorie versenden (sofern R die gleiche Ansicht über den eigenen Nachrang gemäß StVO hat). Der implementierte Manöverplaner ist jedoch in der Lage, diesen Prozess zu optimieren. Wie oben erwähnt, behandelt er jede Trajektorie von R intern wie eine Bedarfstrajektorie. Daher wird auch die bislang gesendete Trajektorie von R bereits bzgl. einer eventuellen Kooperationsgewährung beurteilt. Diese Beurteilung fällt in diesem Fall positiv aus, da die Kosten, die durch die erforderliche Verzögerung auf ca. 50kmh entstehen, als akzeptabel

gering eingestuft werden. Somit wird proaktiv die eigene Bezugstrajektorie angepasst und versendet. Es entstehen die Trajektorien aus der nächsten Abbildung. Im Diagramm Cooperation-Acceptance sieht man, wie der Wert auf 2 springt. Der Kostenwert von B liegt erkennbar unter der Schwelle.

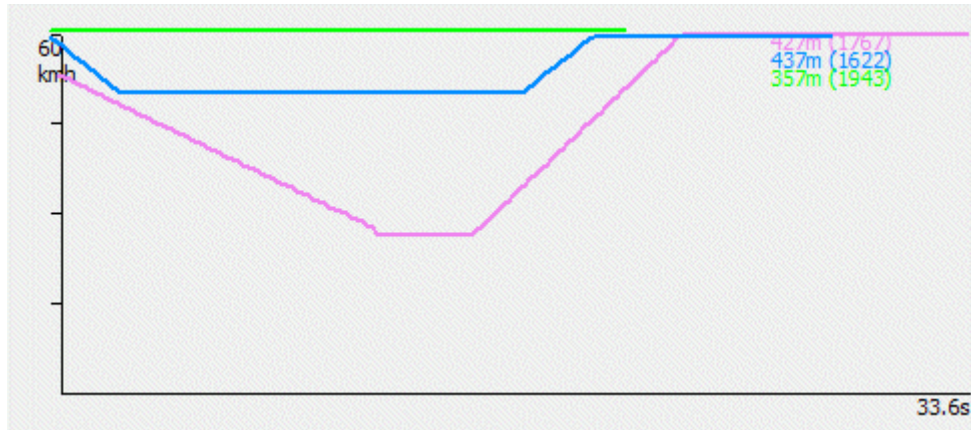


Abbildung 34: Geschwindigkeitsverlauf der Trajektorien zum Zeitpunkt $t=14.0s$

Zum Zeitpunkt 26.6sec ist das entstehende Manöver so weit abgeschlossen, dass R die Kreuzung erreicht hat. B kann wieder eine Trajektorie planen, die auf seine ursprüngliche Geschwindigkeit zurück gehen. Der Wert im Diagramm *Cooperation Acceptance* geht zurück auf 1. Das gesamte Manöver aus Sicht von B hat ca. 14sec gedauert.

Der Geschwindigkeitsverlauf im Diagramm *Velocity* über die Manöverdauer hinweg zeigt, dass die ursprünglich ($t=14.0sec$) von B für die Kooperation geplante Trajektorie nicht ganz eingehalten wurde. Bereits vor 26.6sec erhöht es seine Geschwindigkeit leicht. Da zum einen bei B die Geschwindigkeit von R am Anfang zeitweise auf 48kmh fiel, zum anderen R offenbar etwas schneller fahren konnte als vorgesehen und dies über die fortlaufend ausgetauschten Bezugstrajektorien ersichtlich wird, kann B bereits zu einem früheren Zeitpunkt auf eine etwas schnellere Trajektorie adaptieren.

Anmerkung: Prinzipbedingt ist die Verhandlungsphase zu Beginn der Kooperation aufgrund der auftretenden Latenzen problembehaftet. Die Anfragen von A basieren auf Bezugs-/Alternativtrajektorien von B, die z. B. ein Zyklus=333ms alt sind. Bis B wiederum die Bedarfstrajektorie von A bewertet, vergehen weitere z.B. 333ms. Somit sind dann seit einer ursprünglich gesendeten und für B akzeptablen Alternativtrajektorien insgesamt 666ms vergangen, was dementsprechend zu höheren - möglicherweise zu jetzt zu hohen Kosten - für B führt. Denn während dieser 0.666sec ist B mit seiner aktuellen Geschwindigkeit weitergefahren. Tendenziell wird A weniger anfordern als B dann gewähren muss - falls im Verlauf der entsprechenden Trajektorien nicht eine konstante Geschwindigkeit für die angenommene Dauer der Verhandlungsphase vorgesehen ist. Letzteres ist in der jetzigen Implementierung nicht der Fall.

4.1.2 Einbeziehung des Fahrers oder einer höheren Entscheidungsinstanz

Der Entscheidungsprozess, ob eine Kooperationsanfrage gewährt wird, ist im implementierten Manöverplaner zweistufig. Die erste Stufe entscheidet anhand einer Kostenbewertung, ob die

Kosten für das altruistische Manöver gegenüber der egoistischen Lösung unterhalb einer definierten Schwelle liegen. In der zweiten Stufe wird entschieden, ob das erforderliche Manöver so große Änderungen erfordert, dass eine höhere Entscheidungsinstanz - menschlich oder maschinell - ihre Zustimmung erteilen muss. Große Änderungen sind z. B. ein Spurwechsel oder eine deutlich reduzierte Geschwindigkeit.

Das folgende Szenario beschreibt mögliche Auswirkungen, wenn das Einholen der zusätzlichen Zustimmung erforderlich wird und dafür entsprechend zusätzliche Zeit benötigt wird - bei einem menschlichen Fahrer mehr als bei maschinell. Hier wird ein Zeitverzug für die Zustimmung einer Kooperation von einem Berechnungszyklus = 0.33sec angenommen. Das Szenario entspricht dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen, nur dass die Startposition des hinteren Fahrzeugs B etwas nach vorne verlegt wurde (5m = 0.3s bei 60kmh). Somit muss B stärker die Geschwindigkeit reduzieren um den gleichen freien Manöverraum für R zu schaffen.

Die erste Phase, solange B noch nicht beteiligt ist, ist genauso wie oben beschrieben. Doch als B die Kreuzung als relevant erkennt und die Entscheidung über die implizite Bedarfstrajektorie ansteht, ist diesmal die benötigte Änderung so groß, dass die interne höhere Instanz um Zustimmung befragt wird. Während dieses internen Prozesses wird weiterhin die egoistische Trajektorie gesendet, die nun in Konflikt mit der von R gesendeten Trajektorie steht.

R erkennt den Konflikt und - da R gemäß StVO nachrangig ist - reagiert es konzeptgemäß, in dem eine Bezugstrajektorie geplant wird, die hinter B und G die Kreuzung quert und zusätzlich eine Bedarfstrajektorie versendet wird, die zwischen beiden queren möchte.

Das nachfolgende Bild zeigt den Zeitpunkt, wo B bereits positiv auf den gemeldeten Bedarf von R reagiert hat, aber R dies noch nicht empfangen und verarbeitet hat. Durch die zusätzlich benötigte interne Abstimmzeit (0.33sec) und die Positionsverschiebung (entspricht 0.3s) sinkt die erforderliche Geschwindigkeit von B für die Gewährung der Kooperation auf 48km/h. Man kann auch erkennen, dass die Bedarfstrajektorie von R eine andere als im vorherigen Fall ist. Im vorherigen Fall war ihr Ziel, G dazu zu bewegen, R vorher queren zu lassen. Hier ist das Ziel, hinter G aber vor B zu queren.

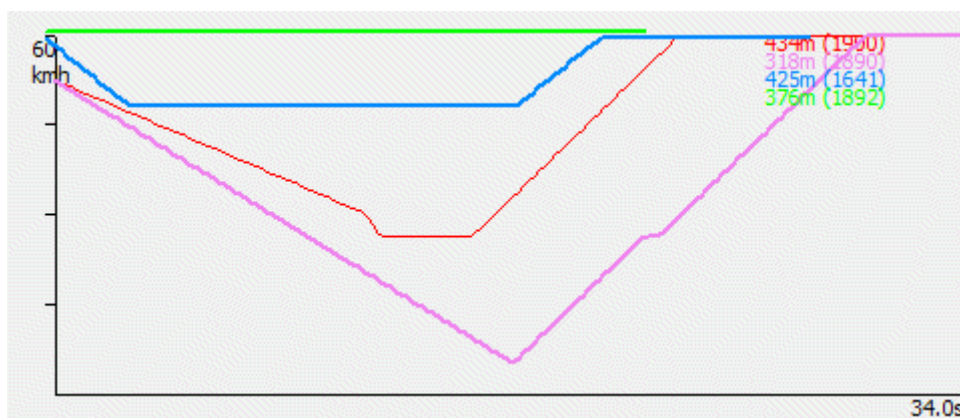


Abbildung 35: Trajektorien zum Zeitpunkt $t=13.7s$

Das nachfolgende Diagramm zeigt einige Kenngrößen des veränderten Manövers. Zusätzlich hinzugekommen ist ein Diagramm *Cooperativeness*, das zeigt, ob R die anderen Fahrzeuge als bereit zu einer Kooperation oder als ablehnend einschätzt. Außerdem ein Diagramm *Driver-Acknowledge*, das von B und G anzeigt, ob die höhere Instanz um Zustimmung gebeten wird, was in diesem Szenario bei 13.7sec der Fall ist. Bei 13.3sec geht hier der Wert bei der Cooperation-Acceptance bei B kurz auf 0, weil sich hier B bewusst für die egoistische Trajektorie entschieden hat, solange der Prozess der Abstimmung mit der höheren Instanz läuft.

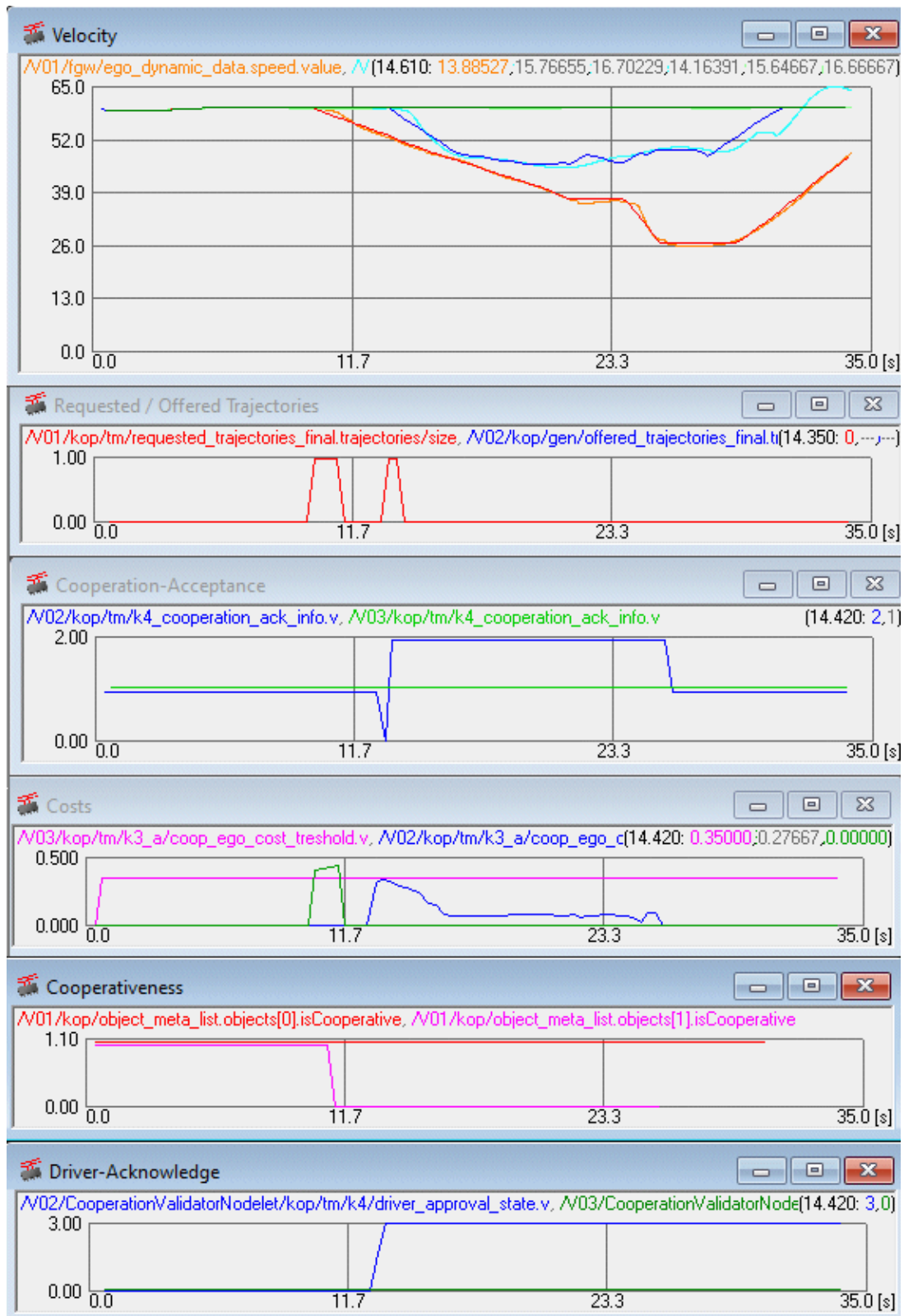


Abbildung 36: Messung F5_Scenario3b_V02_Accept_by_Drv_2021-11-11-15-12-08_ok.bag resultierend aus CarMaker Simulation von F5-Scenario 3b, Testrun "V02 AcceptByDrv"

4.1.3 Gleichzeitige Kooperation mit zwei Partnern

Im Kreuzungsbereich können Situationen vorkommen, bei denen zwei Fahrzeuge gleichzeitig eine Kooperationsanfrage eines Dritten akzeptieren müssen, bevor sie zustande kommen kann. Dies ist z. B. in dem nachfolgenden Bild skizziert, wo B und G zustimmen müssen, damit R vor ihnen beiden die Kreuzung queren und vor G einscheren kann.

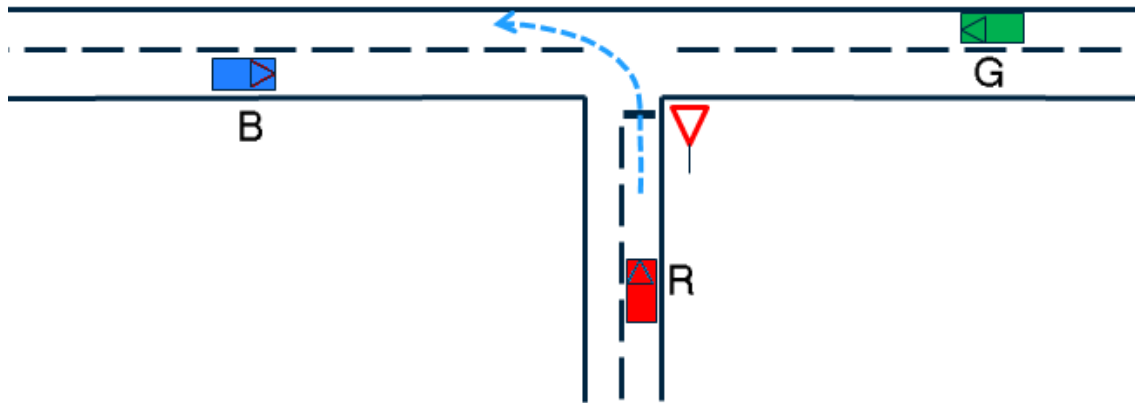


Abbildung 37: Bild des Szenarios F5.3: Linksabbieger auf Landstraßen, zwei Fahrzeuge von rechts und links

Hier müssen sowohl B als auch G in Vorleistung treten und die Kooperation von sich aus ermöglichen, ohne zu wissen, ob auch das andere notwendige Fahrzeug dem letztlich zustimmen wird. Bei dem untersuchten Kooperationskonzept wird die effektive und zuverlässigere Lösung solcher Situationen durch die Alternativtrajektorien ermöglicht. Mit Hilfe dieser kann ein Fahrzeug den anderen mitteilen, zu welchen Eingriffen es ggf. bereit wäre, um einen Kooperationsbedarf zu ermöglichen. Wenn diese verschickt werden, dann wissen in diesem Fall B bzw. G was der andere bereit ist zu tun und können entsprechend die Eingriffe zur Kooperationsgewährung von ihrer Seite mit mehr Sicherheit einleiten oder auch erst einmal verweigern.

In dem folgenden Bild werden zwei Simulationsdurchläufe verglichen, bei denen in der linken Hälfte ein Fall dargestellt ist, wo Alternativtrajektorien gesendet werden, im rechten dagegen nicht. Da der implementierte Manöverplaner bei der Erfüllung fremder Bedarfstrajektorien von allen weiteren Fahrzeugen immer deren Bezugstrajektorien verwendet, findet er ohne Alternativtrajektorien keine konfliktfreie Lösung der Gesamtsituation (die fremde Bezugstrajektorie ist in Konflikt mit der fremden Bedarfstrajektorie), somit blockieren sich B und G und es kommt keine Kooperation mit R zustande. Man kann erkennen, dass die Geschwindigkeit von B und G in diesem Fall konstant bleibt, das heißt die Insassen der Fahrzeuge werden keine Auswirkung des gescheiterten Versuchs einer Kooperation spüren.

Alternative Implementierungen könnten eine (ggf. aufwändige) Situationsbetrachtung aus Sicht des benötigten zweiten Kooperationspartners vornehmen oder auch auf die Bedingung der fremden Bezugstrajektorie verzichten. Letzteres könnte wiederum zu unnötigen Eingriffen in die eigene Fahrzeugführung führen oder - in anderen Situationen - zur Gewährung von aufgrund der Gesamtsituation doch nicht-realiserbaren Bedarfen.

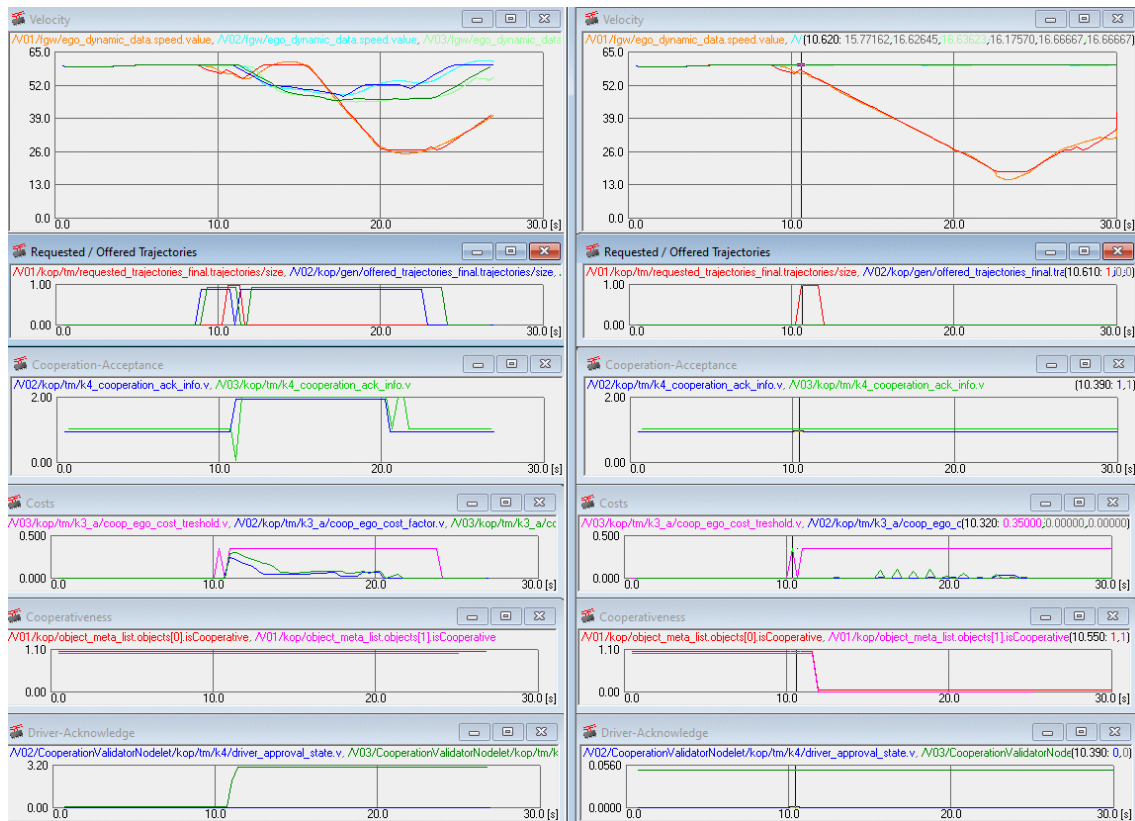


Abbildung 38: Messung F5_Scenario3_2021-11-09-19-35-32_both_same_ok.bag vs. F5_Scenario3_2021-11-09-19-33-46_both_same_nok_noOffer.bag; resultierend aus CarMaker-Simulation von F5-Szenario 3, Testrun "Both same"

4.1.3.1 Auswirkung falscher Alternativtrajektorien

Andererseits bieten auch Alternativtrajektorien keine absolute Sicherheit, dass eine Kooperation zwischen allen beteiligten Partner zustande kommt. Die Auswirkungen falscher Trajektorien bei dem implementierten Manöverplaner (oder bei anderen die Auswirkung der falschen Einschätzung der Kooperationsbereitschaft anderer Kooperationspartner) ist in dem folgenden Verlauf bei dem gleichen Szenario zu sehen.

In diesem Fall versendet B Alternativtrajektorien, die es selber bei der Kooperationsevaluierung abgelehnt hat. Fahrzeug G ist selber bereit, den Bedarf von R zu ermöglichen und nimmt aufgrund der Alternativtrajektorie an, dass B ebenfalls dazu bereit ist. Daher passt G seine Bezugstrajektorie an und wird langsamer. Allerdings setzt B die gesendete Alternativtrajektorie doch nicht um und folglich kann R nicht wie gewünscht vor beiden Fahrzeugen abbiegen, sondern sendet weiter Bedarfstrajektorien. Bis zum Zeitpunkt 11.6sec wartet G noch, dass B ebenfalls auf die Kooperation eingeht. Dann erst gibt G die Kooperation auf (=der implementierten Manöverplaner bekommt jetzt von B keine passenden Alternativtrajektorien mehr) und geht zurück auf die eigene egoistische Trajektorie.

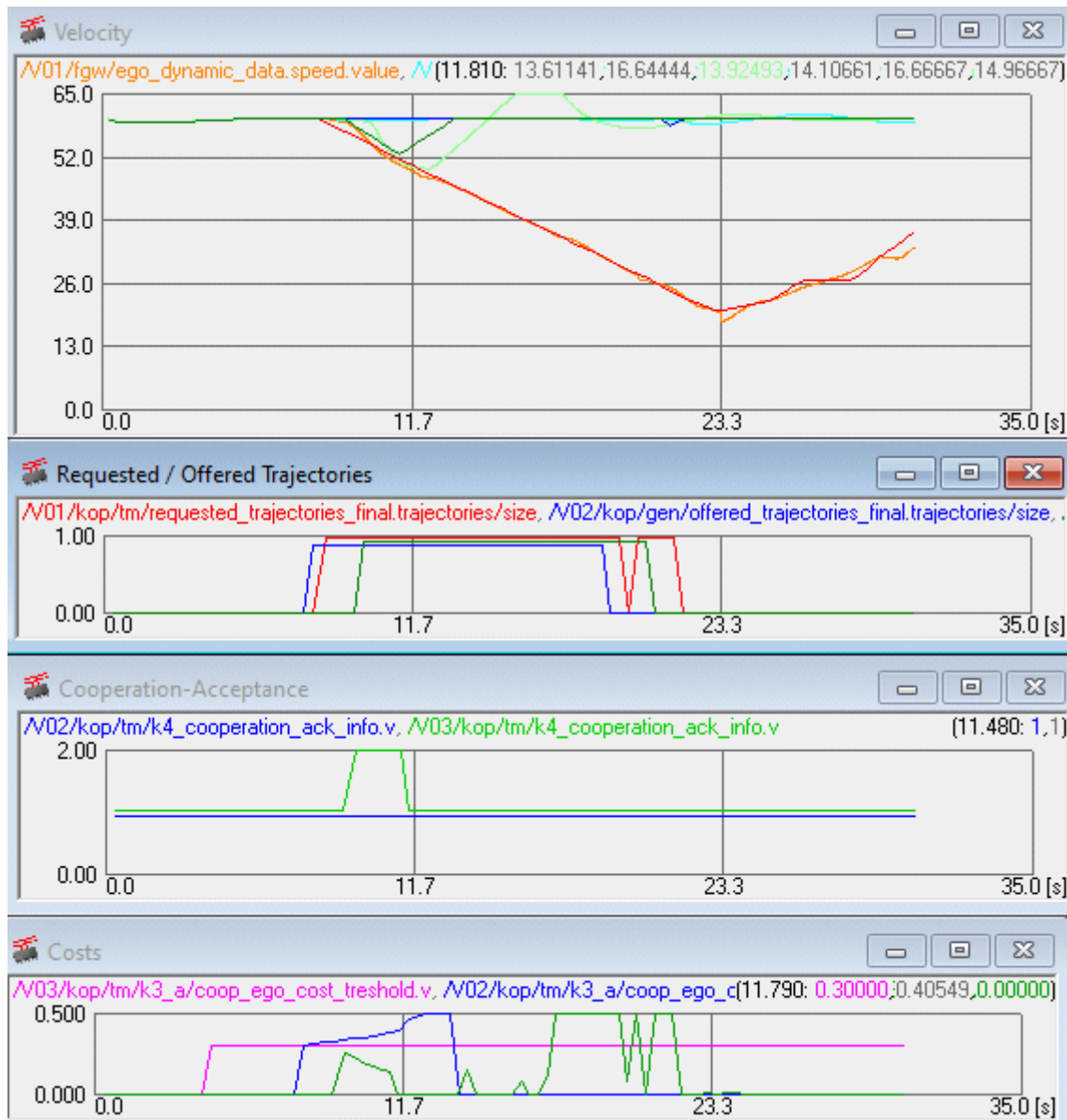


Abbildung 39: Messung F5_Scenario3_2021-10-27-16-39-46.bag; F5-Szenario 3

4.1.3.2 Zeit-verzögerte Kooperation mit zwei erforderlichen Teilnehmern

Anhand des beschriebenen Szenarios, wo zwei Fahrzeuge B und G von rechts und links gleichzeitig einer Kooperationsanfrage von R zustimmen müssen, kann exemplarisch die Auswirkung von verspäteten Ablehnungen durch relevante Teilnehmer gezeigt werden.

Hier wurde nun die Konfiguration so gewählt, dass G nicht gleichzeitig wie B die Relevanz der Kreuzungssituation für sich erkennt, sondern etwas später. G hat einen etwas kürzeren Planungshorizont als B.

B geht - unbeeinflusst von der kurzen Trajektorie G - zuerst auf die Anfrage von R ein und verzögert entsprechend. Kurz darauf erkennt auch G mit seinem Planungshorizont die Relevanz der

Situation und evaluiert die implizite Bedarfstrajektorie von R. Diese Entscheidung ist hier negativ, d. h. G behält seine Geschwindigkeit bei. Somit ist auch die Kooperation zwischen R und B nicht mehr durchführbar. Sie wird bei ca. $t=9.8\text{sec}$ abgebrochen.

Im Geschwindigkeitsverlauf zeigt sich, dass B entsprechend seiner Zustimmung bereits verzögert hat und dann nach der Ablehnung durch G wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt. G dagegen fährt mit konstanter Geschwindigkeit durch. R hält bis 9.8sec die Geschwindigkeit und muss dann aber doch bremsen, um B und G vorbei zu lassen.

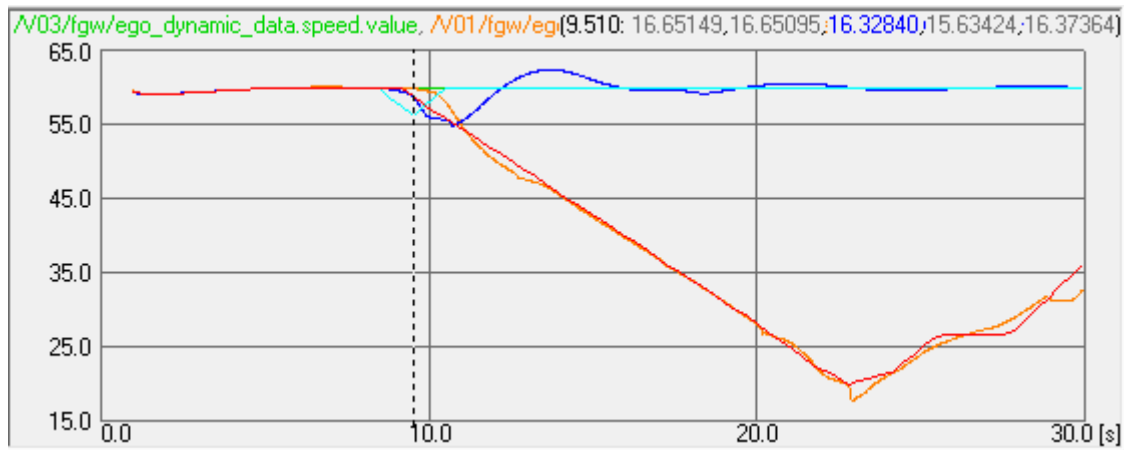


Abbildung 40: Messung F5_Scenario3_2021-10-27-20-43-46_second_aborts.bag, basierend auf CarMaker-Szenario F5-Szenario3

4.1.4 Erkennung der Kooperativität anderer Teilnehmer / Auswirkung schlechter Bedarfstrajektorien

Bei mehreren möglichen Kooperationspartnern ist es von wesentlicher Bedeutung, welches Fahrzeug für die Umsetzung eines eigenen Bedarfs implizit adressiert wird. In den vorherigen Szenarien F5.3b wurde zuerst das vordere Fahrzeug G und nach dessen Ablehnung das hintere Fahrzeug B adressiert. Dies war möglich, weil die implementierte Manöverplanung eine Erkennung der Kooperativität der möglichen Partner integriert hat. Diese versucht, aus dem Verlauf von der gesendeten Bedarfs- und empfangen Bezugstrajektorien zu erkennen, ob ein Fahrzeug bereit ist, den eigenen Bedarf zu gewähren oder nicht.

Der Fall mehrerer möglicher Kooperationspartner ergibt sich z. B., wenn stark unterschiedliche Planungshorizonte vorliegen. Sind sie ähnlich, dann wird es oft nur einen Partner geben, weil die Trajektorie des zweiten noch nicht die Konfliktzone erreicht hat. Bei der Funktion F1 z. B. gibt es i. d. R. nur einen relativ schmalen Variationsspielraum, wo Fahrzeuge einfädeln können.

Ohne eine solche Erkennung würde R eine lange Zeit die Trajektorie senden, die es ihm ermöglicht, vor G und B zu queren. Denn aus Sicht von R ist das eine mögliche und - seiner Einschätzung nach - für die anderen akzeptable Möglichkeit.

Eine Einschätzung, wie weit fremde Fahrzeuge gehen würden, um eigene Wünsche zu erfüllen, ist schwierig und fehlerbehaftet. Daher hilft hier zusätzliche Erkennung, ob fremde Fahrzeuge

die eigenen Bedarfstrajektorien ablehnen oder nicht. Die Auswirkung, wenn eine solche Erkennung fehlt, zeigt das folgende Bild. In den Diagrammen auf der linken Seite war die implementierte Erkennung aktiv. In den Diagrammen auf der rechten Seite war sie ausgeschaltet.

Man kann sehen, dass der Eingriff von B anstatt bei 9.3sec erst bei 14.0sec und somit entsprechend stärker erfolgt. Das Szenario ist hier nur deshalb nicht gescheitert, weil R irgendwann die Kosten für G als zu hoch eingeschätzt hat und doch noch B adressiert hat. Und weil in diesem Moment bei B die Kosten für das nun heftigere Manöver gerade noch akzeptabel waren.

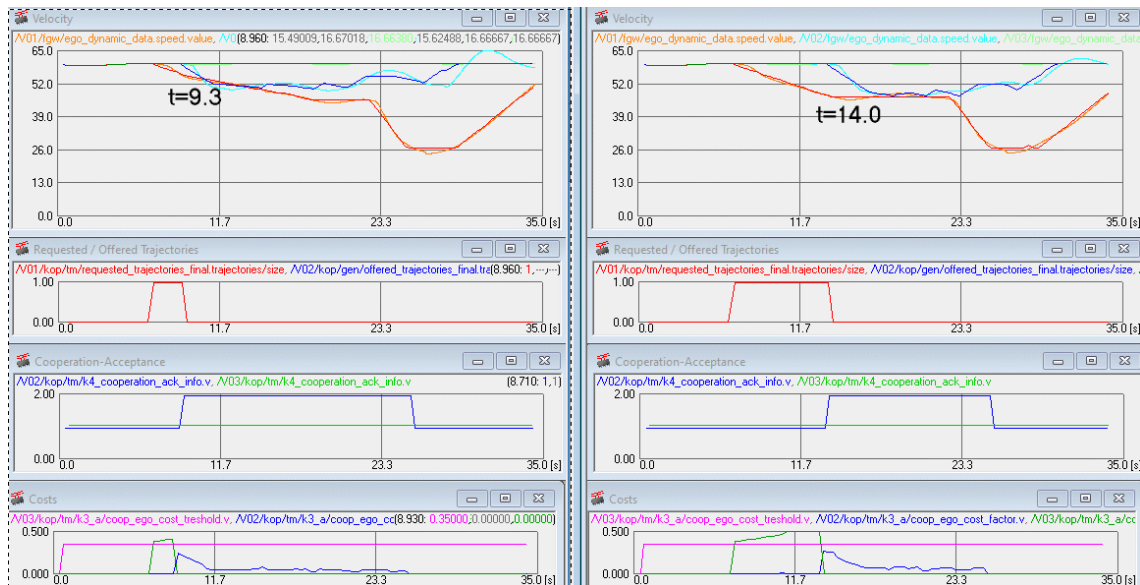


Abbildung 41: Messung F5_Scenario3b_V02_AcceptByDrv_ok_2021-11-15-16-10-47.bag vs. F5_Scenario3b_V02_AcceptByDrvNoMeta_ok_2021-11-15-16-12-30.bag; F5-Scenario 3b, Testrun "V02 AcceptByDrv"

Die Erkennung, ob ein anderes Fahrzeug eine Trajektorie angenommen oder abgelehnt hat, ist allerdings schwierig, da zum einen die Reaktionen ggf. nur gering sein können. Dazu kann es ein unterschiedliches Verständnis geben, ob ein Bedarf akzeptiert wurde oder nicht, da es ein unterschiedliches Verständnis geben kann, ob eine Lösung konfliktfrei ist oder nicht - also z.B. ob enthaltene Sicherheitsabstände akzeptabel sind oder nicht. Zudem ist es aufgrund des zustandslosen Protokolls, Latenzen bei der Verarbeitung (siehe auch Stichwort Fahrerbeteiligung) und möglicher Übertragungsfehler nicht klar, ob und wann ein Fahrzeug die eigene Trajektorie empfangen und sie in die Planung einbezogen hat.

Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde die bewusste Ablehnung von empfangenen Bedarfstrajektorien mit über das Protokoll übertragen, damit der ursprüngliche Sender mögliche Partner schneller und zuverlässiger ausschließen kann. D. h. es wurde die ID der fremden Bedarfstrajektorie mit in der eigenen MCM versendet. Dadurch konnten deutliche Verbesserungen hinsichtlich Erkennungsqualität und -geschwindigkeit erzielt werden. Was sich positiv auf das kooperative Bewältigen der dargestellten Szenarien ausgewirkt hat - insbesondere, wenn viele Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn sind und viele mögliche Kooperationspartner existieren.

Anmerkung: es wurde auch die bewusste Akzeptanz von fremden (Bedarfs-)Trajektorien übertragen (im Fall einer aktiven Kooperation). Dies hatte aber nur den Grund einer einfacheren Evaluation und wurde nicht von der Manöverplanung genutzt.

4.1.5 Störungen

Hier werden exemplarisch die Auswirkungen zweier möglicher Störungen betrachtet.

- Kooperationsgewährender zieht während einer laufenden Kooperation seine Zustimmung zurück
- eine Kooperation kann nicht mehr durchgeführt werden, weil eine äußere Störung auftritt
 - hier am Beispiel eines menschlichen Fahrers, der in das bis dahin (teil-)automatisiert agierende System eingreift.

Nicht besonders betrachtet wird z.B.:

- erhöhte Latenzen
 - Latenzen können in Abhängigkeit der verwendeten Funktechnologie unterschiedliche sein, z.B. LTE vs. 802.11p.
 - Die Latenz in der Simulation betrug 330ms (=1 Zyklus) für das Senden, 660ms für die Antwort auf eine eigene Sendung.
 - Die Auswirkungen sollte ähnlich sein wie im Unterkapitel "[Einbeziehung des Fahrers oder einer höheren Entscheidungsinstanz](#)". Kritisch ist die Phase der Abstimmung (Gefahr des Scheiterns aufgrund zu später Reaktion) und die Reaktion auf unerwartete Ereignisse.
- Kommunikationsstörungen
 - Im Moment des Auftretens sollten die Effekte ähnlich sein wie eine erhöhte Latenz.

4.1.5.1 Eine Kooperationszusage wird später zurückgezogen

In diesem Fall kommt die Kooperation wie zuvor beschrieben zustande. R stellt seine Anfrage, B stimmt ihr nach Rückversicherung mit der höheren Instanz zu. Es kommt noch zu einer weiteren Aussendung von R, weil R die Sicherheitsabstände noch etwas zu eng sind, aber dann ist die Kooperation stabil und die Trajektorien werden so gefahren wie geplant. Zum Zeitpunkt $t=22.1\text{sec}$ zieht jetzt B jedoch aus irgendwelchen Gründen seine ursprüngliche Zusage zurück. Dies ist erkennbar im Diagramm Cooperation-Acceptance, wo der Wert für B von 2 auf 0 zurückgeht. R empfängt die neue Bezugstrajektorie und stellt fest, dass es die eigene bevorzugte Trajektorie nicht mehr weiterverfolgen kann. Somit wechselt R auf eine Trajektorie, die es stark bremsen, warten und dann hinter R und G die Kreuzung queren lässt (siehe Knick im Geschwindigkeitsverlauf), und sendet wieder Bedarfstrajektorien aus, um eine neue Kooperation aufzubauen. Dies wird jedoch von B nicht angenommen. R stuft infolgedessen dann B als nicht-kooperativ ein und bricht das Senden weiterer Bedarfstrajektorien ab. Das Manöver geht unkooperativ aber unfallfrei zu Ende.

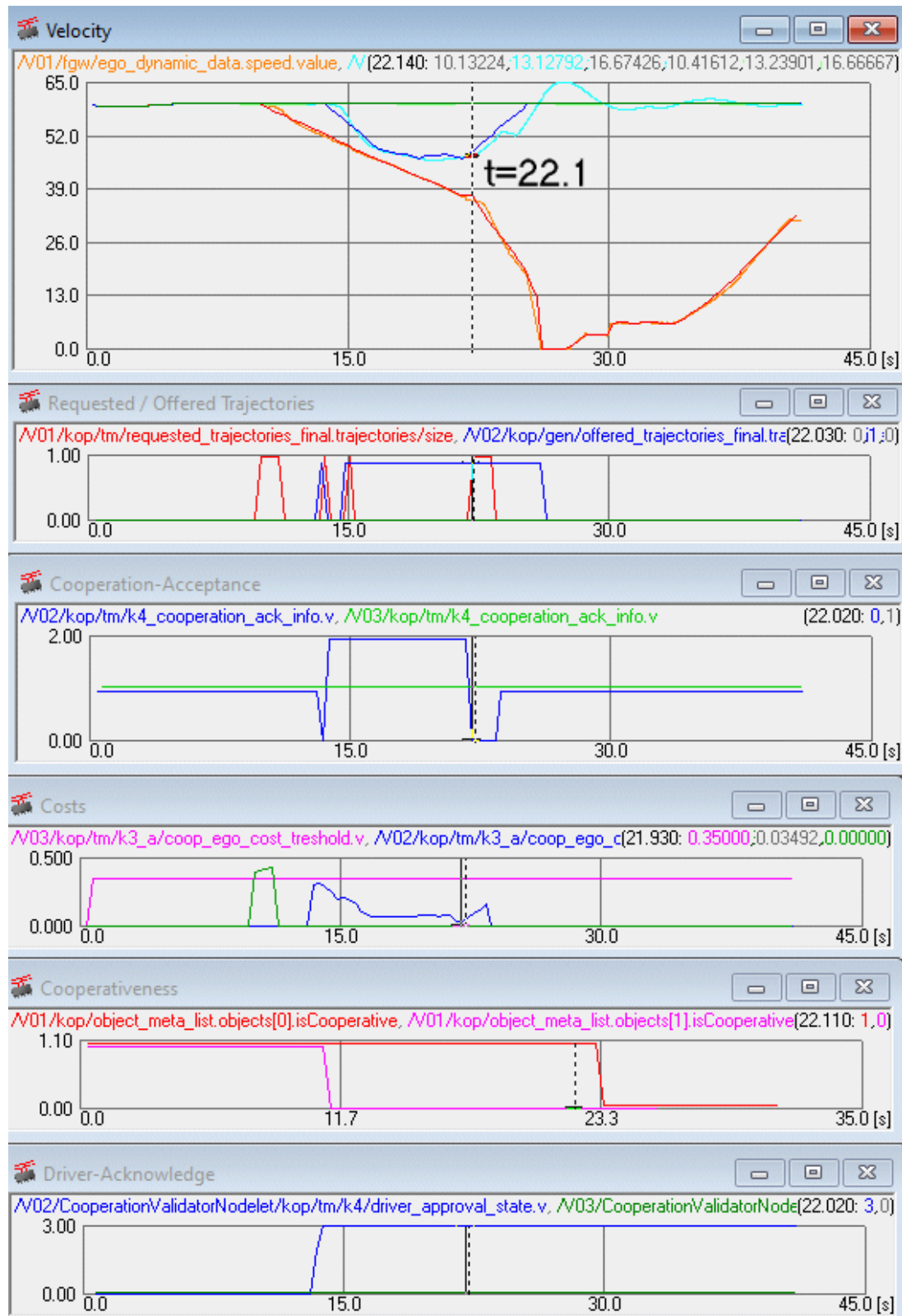


Abbildung 42: Messung F5_Scenario3b_V02_AcceptByDrvAcc_2021-11-18-11-34-26_acc.bag;
F5-Scenario 3b, Testrun "V02 AcceptByDrvAcc"

4.1.5.2 Manueller Fahrereingriff stört andere Kooperation

Hier wird angenommen, dass Fahrzeug G, welches an der Kooperation nach dem vorangegangenen Muster nicht beteiligt ist, da es sie abgelehnt hat, plötzlich bremst - z. B. weil dessen Fahrer ins System eingreift. Dies geschieht in der Simulation zum Zeitpunkt $t=17.8\text{sec}$. Der kooperative Manöverplaner von G erkennt den Fahrereingriff und sendet nun eine Trajektorie, die es aus dem Fahrerverhalten schätzt. Diese Schätzung basiert in der aktuellen Implementierung zur Vereinfachung rein auf der gemessenen Fahrzeuglängsverzögerung. Diese Längsverzögerung wird für 3sec weiter fortgeführt, bevor dann eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit angenommen wird. Da die Längsverzögerung verspätet dem Bremseneingriff des Fahrers folgt, dauert es entsprechend bis auch die geschätzte Fahrertrajektorie die Verzögerung wieder spiegelt.

Zum Zeitpunkt $t=18.8\text{sec}$ erkennt R, dass es das gewünschte Manöver nicht wie geplant durchführen kann. Es wechselt auf eine Trajektorie, die es hinter G und B queren lassen würde und sendet eine Bedarfstrajektorie für eine neue Kooperation. B dagegen erkennt, dass G verzögert, und verzögert seinerseits - wenn auch etwas weniger, da geringe Geschwindigkeiten bei einem konstanten zeitlichen Abstand einen geringeren räumlichen Abstand bedeuten. Die neue Bedarfstrajektorie von R wird aufgrund zu hoher Kosten für deren Erfüllung nicht erfüllt (siehe Peak im Diagramm *costs*).

Zum Zeitpunkt $t=19.5\text{sec}$ ist aus dem Trajektorienverlauf von G für R ersichtlich, dass es nun vor G und B die Kreuzung queren kann - was der bevorzugten Lösung für das Manöver entspricht. Daher plant es eine Trajektorie, die möglichst effizient und schnell auf die Kreuzung zufährt. Gleichzeitig entfällt damit der Grund für das weitere Senden von Bedarfstrajektorien.

Die folgenden Bilder zeigen den Signalverlauf für das simulierte Szenario und die einzelnen Trajektorien kurz vor $t=17.8\text{sec}$, bei 18.8sec und nach 19.5sec .

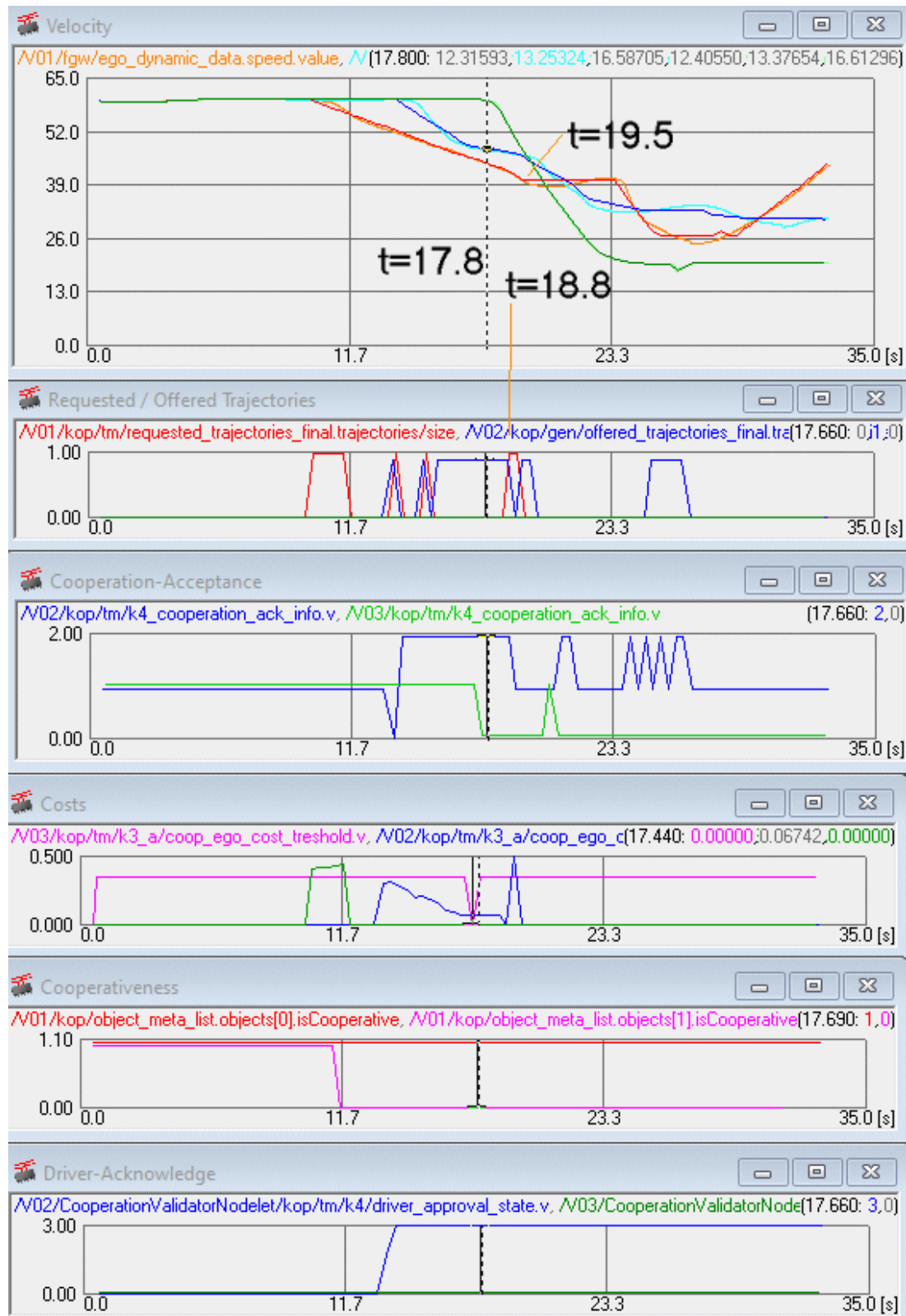


Abbildung 43: Messung F5_Scenario3b_V03_manualBrake_2021-11-16-18-35-35.bag; F5-Szenario 3b, Testrun "V02 AcceptByDrv"

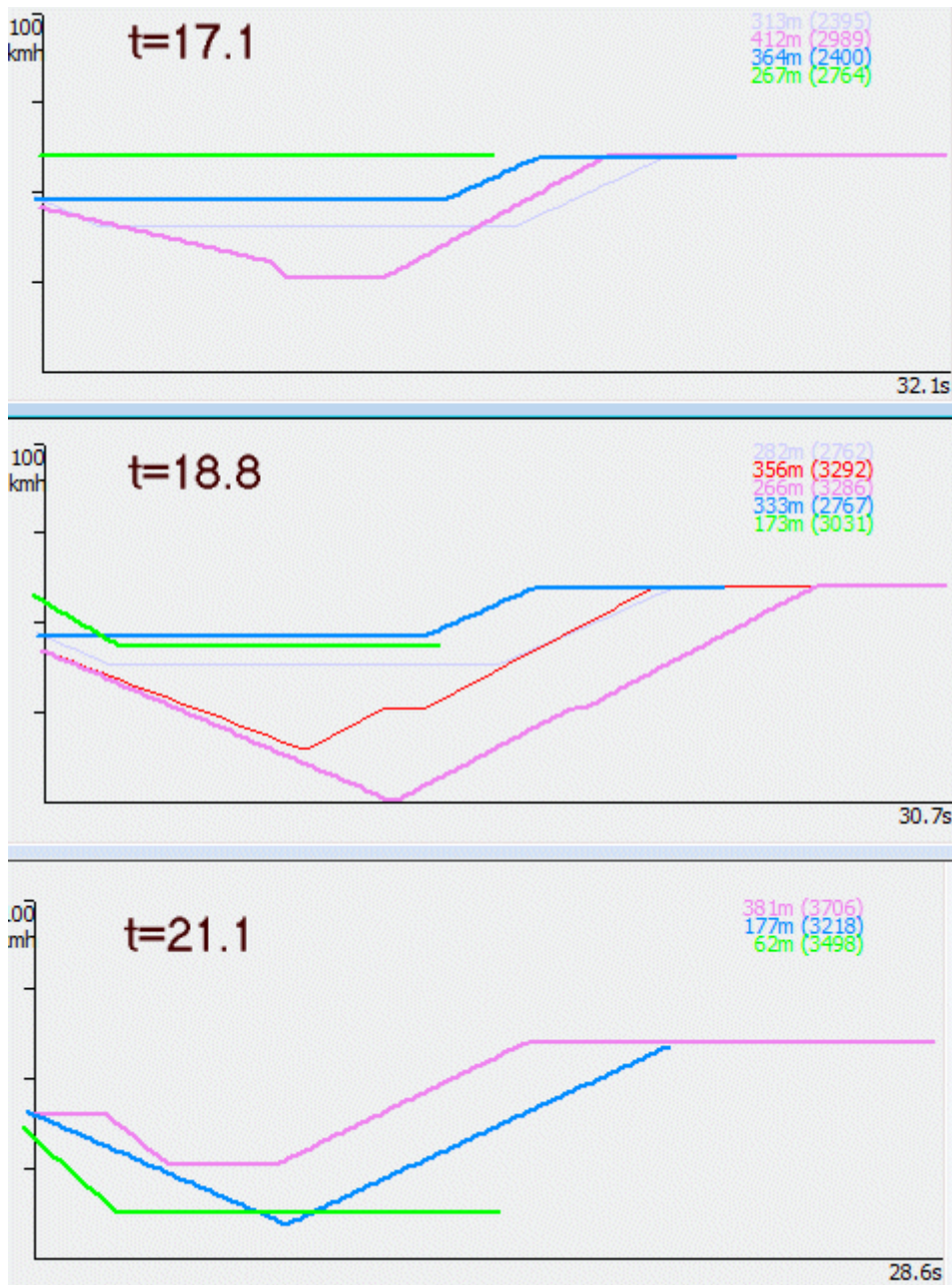


Abbildung 44: Trajektorienverläufe für drei ausgewählte Zeitpunkte

4.1.6 Verschachtelte Kooperationen am Beispiel Autobahnauffahrt

Im Folgenden wird exemplarisch der Verlauf mehrerer verschachtelter Kooperationen in einer komplexeren Situation beschrieben. Hier müssen zum Lösen einer Situation zwei unterschiedliche Kooperationen durchgeführt werden.

Das Bild zeigt eine typische Autobahnsituation. Fahrzeug R (rot) möchte auf die Autobahn auf-fahren. Das Fahrzeug O (orange) ist soweit vorne, dass R hinter ihm einscheren muss. Mit Fahrzeug B (blau) ist eine Kooperation dagegen hilfreich, damit R zwischen B und O einscheren kann. Um die Kosten der Kooperation für B akzeptabel zu halten, möchte B einen Spurwechsel auf den

linken Fahrstreifen vornehmen. Allerdings wird dieser durch das links fahrende Fahrzeug G (grün) blockiert. Folglich müsste G, um B den Spurwechsel zu ermöglichen, etwas langsamer fahren, was bedeutet, dass nun G und B ebenfalls eine Kooperation eingehen müssen.

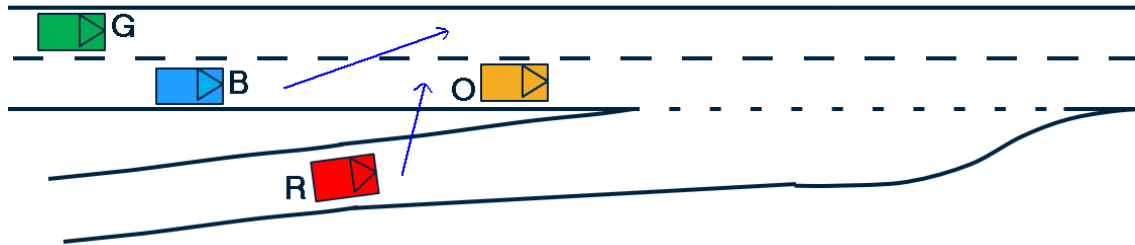


Abbildung 45: Szenario F1 Autobahnauffahrt

Die folgenden beiden Diagramme zeigen den Signalverlauf, wobei das zweite den Zeitausschnitt, in dem die eigentliche kooperative Abstimmung stattfindet, vergrößert darstellt. Zum Zeitpunkt $t=10.2\text{sec}$ erkennt R seinen Kooperationsbedarf und sendet eine Bedarfstrajektorie für B. Bei $t=11.2\text{sec}$ hat B die Anfrage erhalten und sendet nun seinerseits eine Bedarfstrajektorie zum Spurwechsel an G. Da in der aktuellen Konfiguration die Kostenschwelle für B, um eine R auch durch langsamer fahren vor sich einscheren zu lassen, gerade noch akzeptabel war, kann R seine Bedarfstrajektorie bereits jetzt in eine Bezugstrajektorie umwandeln und das gewünschte Manöver durchführen. Bei einer anderen Konfiguration würde B seine egoistische Trajektorie weitersenden und somit auch R das gewünschte Manöver noch nicht durchführen können.

Zum Zeitpunkt $t=12.5\text{sec}$ hat B von G die Bestätigung erhalten, das B ebenfalls seinen Spurwechsel durchführen kann und stellt damit das Senden seiner eigenen Bedarfstrajektorie ein. Damit ist die Situation eigentlich zwischen allen Beteiligten geklärt.

Allerdings findet jetzt die fahrzeug-interne Abstimmung innerhalb B statt, bei der das übergeordnete Fahrzeugsystem zur Zustimmung für den vorgesehenen Spurwechsel angefragt wird. Aufgrund der aktuellen Implementierung des kooperativen Manöverplaners schickt B während dieser Zeit vorläufig seine egoistische Trajektorie, die R sein angefragtes Manöver verweigert. Somit muss R erneut eine Bedarfstrajektorie schicken und auch G wechselt auf dessen alte Trajektorie zurück. Das bedeutet in Folge, dass auch B erneut eine Bedarfstrajektorie für seinen Spurwechsel versenden muss. Eine geschicktere Implementierung des Manöverplaner, bei der die interne Systemrücksicherung z.B. parallel oder vorher stattfindet, würde diese doppelte Abstimmung mit anderen Fahrzeugen vermeiden.

Die kooperative Abstimmung zwischen den Fahrzeugen beginnt ca. 16sec bevor der Spurwechsel von R praktisch durchgeführt wird. Dies ermöglicht es den kooperierenden Fahrzeugen ausreichenden Sicherheitsabstand aufzubauen bevor z. B. ein Fahrstreifenwechsel stattfindet.

Anmerkung: Das Tal im Geschwindigkeitsverlauf von R entsteht maßgeblich dadurch, dass R nach der ersten Beschleunigungsphase auf die Kurve zur Autobahnauffahrt kommt und diese, um die

Querbesehleunigung nicht zu groß werden zu lassen, nur mit ca. 60kmh befährt. Die per Konfiguration erlaubte Querbesehleunigung wird dabei nicht voll ausgenutzt, um erst hinter Fahrzeug O die vorgesehene Position zu erreichen.

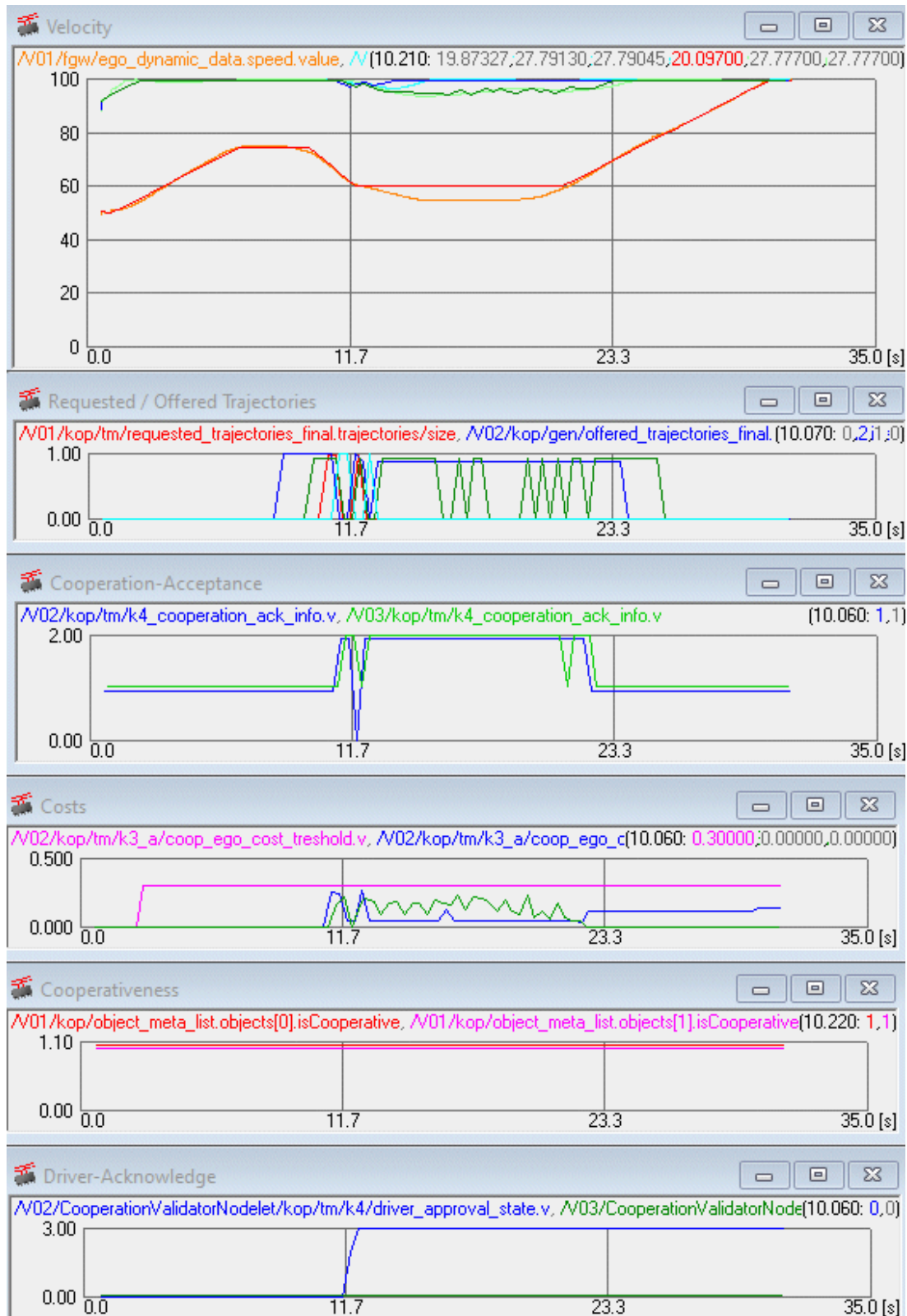


Abbildung 46: Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-15-42-17_vier.bag, Test-run "Standstill"

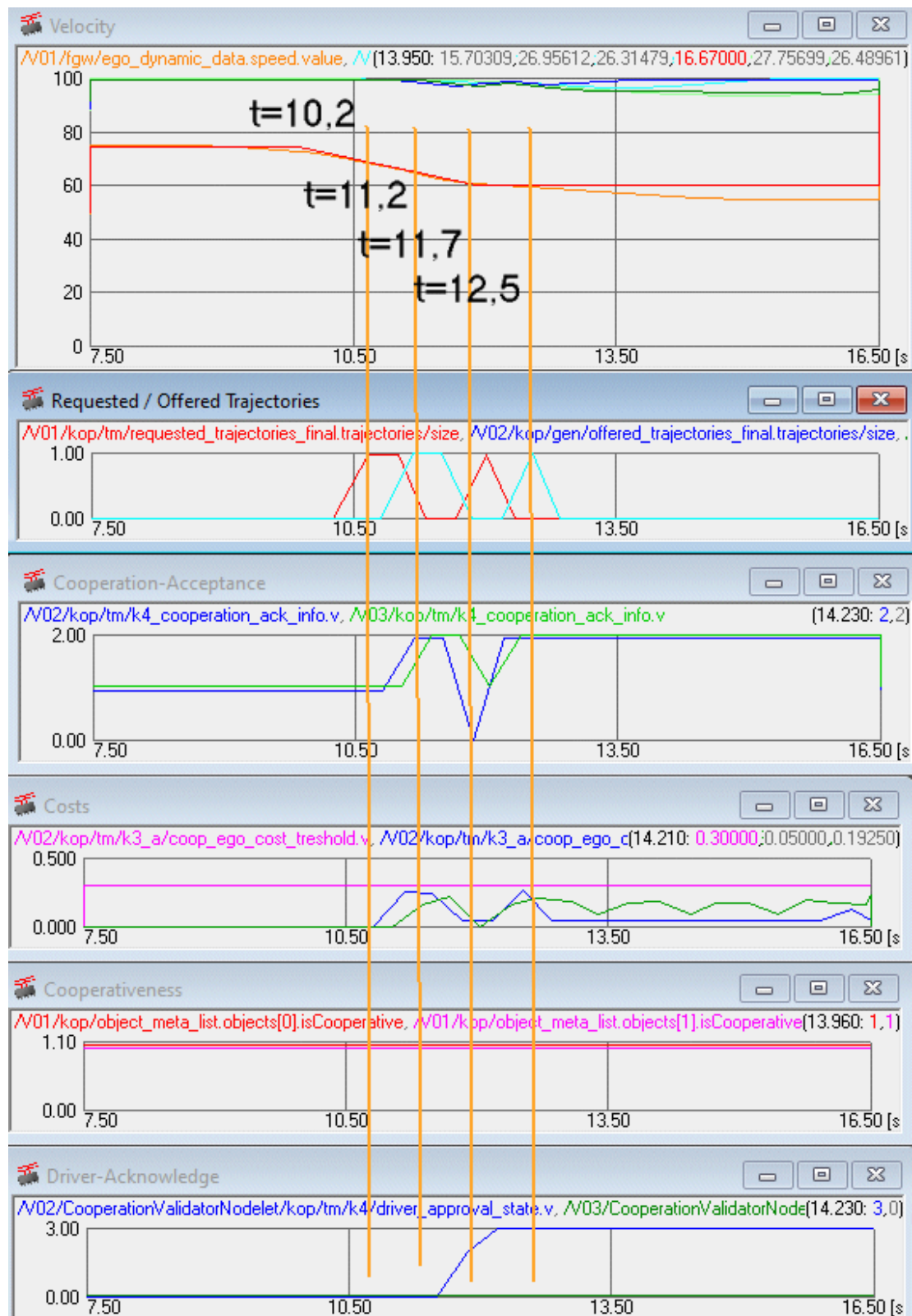


Abbildung 47: Ausschnitt aus Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-15-42-17_vier.bag, Testrun "Standstill"

4.1.7 Langer vs. kurzer Planungshorizont / Abstimmungsvorlauf

Im vorherigen Aufbau lag der Planungshorizont und dementsprechend der Zeitpunkt, an dem die Fahrzeuge sich kooperativ abgestimmt haben, bei ca. 16sec vor dem eigentlichen Spurwechsel. Dies ermöglichte es, den kooperierenden Fahrzeugen bereits im Vorfeld einen ausreichenden zusätzlichen Sicherheitsabstand aufzubauen. Fahrzeug G musste dabei seine Geschwindigkeit nur wenig von 100km/h auf ca.95km/h zurücknehmen. Fahrzeug B konnte 100km/h beibehalten.

Eine lange Prädiktion/Planung kann in der Praxis bei dynamischen Verkehrsgeschehen schwierig zu realisieren sein. Daher zeigt das folgende Bild den Geschwindigkeitsverlauf der beteiligten Fahrzeuge, wobei der Horizont bei ansonsten unveränderten Parametern auf 9sec reduziert wurde. Dies entspricht ungefähr der Position, an der R in seinem Rückspiegel erstmals den rückwärtigen Verkehr sehen könnte. Man kann erkennen, dass die Kooperation jetzt nicht zustande kommt. R muss folglich auf 50kmh abbremesen, um hinter B einzuscheren. Der Grund ist, dass B im Rahmen seiner akzeptablen Möglichkeiten nicht rechtzeitig genug eine ausreichende Lücke aufbauen kann.

Anmerkung: Der kleine Peak im Geschwindigkeitsverlauf von R bei ca. $t=18\text{sec}$ rührt daher, dass erst in diesem Moment durch die Implementierung die Situation "Autobahnauffahrt" erkannt wurde und ab dann passendere Trajektorien bevorzugt wurden.

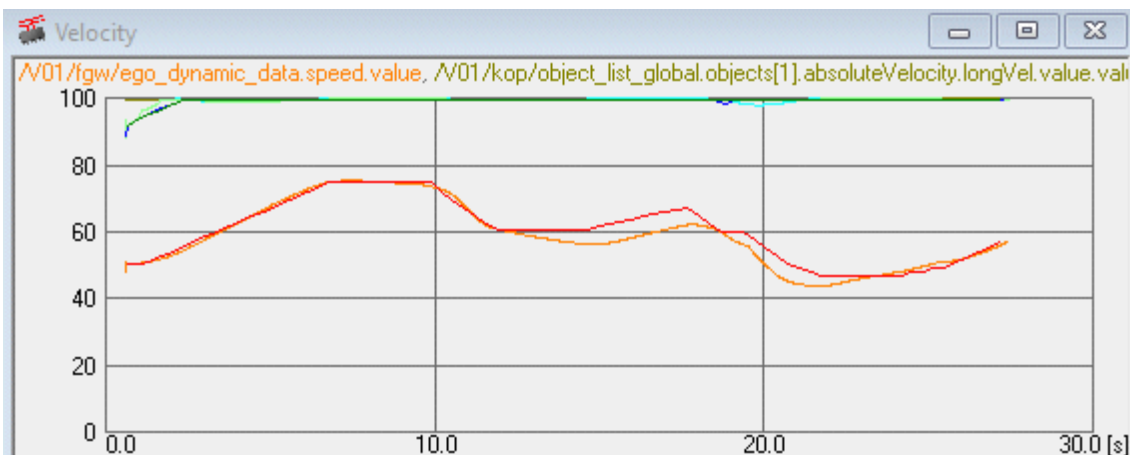


Abbildung 48: Verkürzte Vorschauzeit. Kooperation schlägt fehl. Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-19-15-28_short_fail.bag

Im realen Straßenverkehr werden solche Situationen meist dadurch gelöst, dass für den Moment des Einscherens die Sicherheitsabstände durch den Einfädler verkürzt werden, z. B. von normalerweise 2sec ("halber Tacho") auf 1.2sec. Im folgenden Bild kann man den Geschwindigkeitsverlauf sehen, nachdem die Konfiguration entsprechend angepasst wurde. Da der Manöverplaner sehr kooperativ parametrisiert ist, war hier die Kostengrenze von B noch nicht erreicht. Gegenüber der längeren Planungszeit muss Fahrzeug B seine Geschwindigkeit deutlich stärker verringern, für ca. 5sec von 100 km/h auf 90 km/h. Dies hat ggf. stärkere Auswirkungen

auf den nachfolgenden Verkehr. Die TTC (Time-to-collision) wird im danach folgenden Bild dargestellt. Man kann sehen, wie B ab Beginn der Kooperation die Lücke stetig vergrößert, um R hinein zu lassen.

Bei der gewählten Konfiguration des implementierten Manöverplaners hat in dem Moment, in dem R seine erste Spurwechsel-Trajektorie aussendet ($t=17.7\text{sec}$), dessen geplante Trajektorie eine zeitliche Länge von 12sec . Der geplante Punkt, an dem das Fahrzeug R erstmal in die Hauptfahrbahn hineinragt, liegt bei ca. 6.5sec in 120m Entfernung.

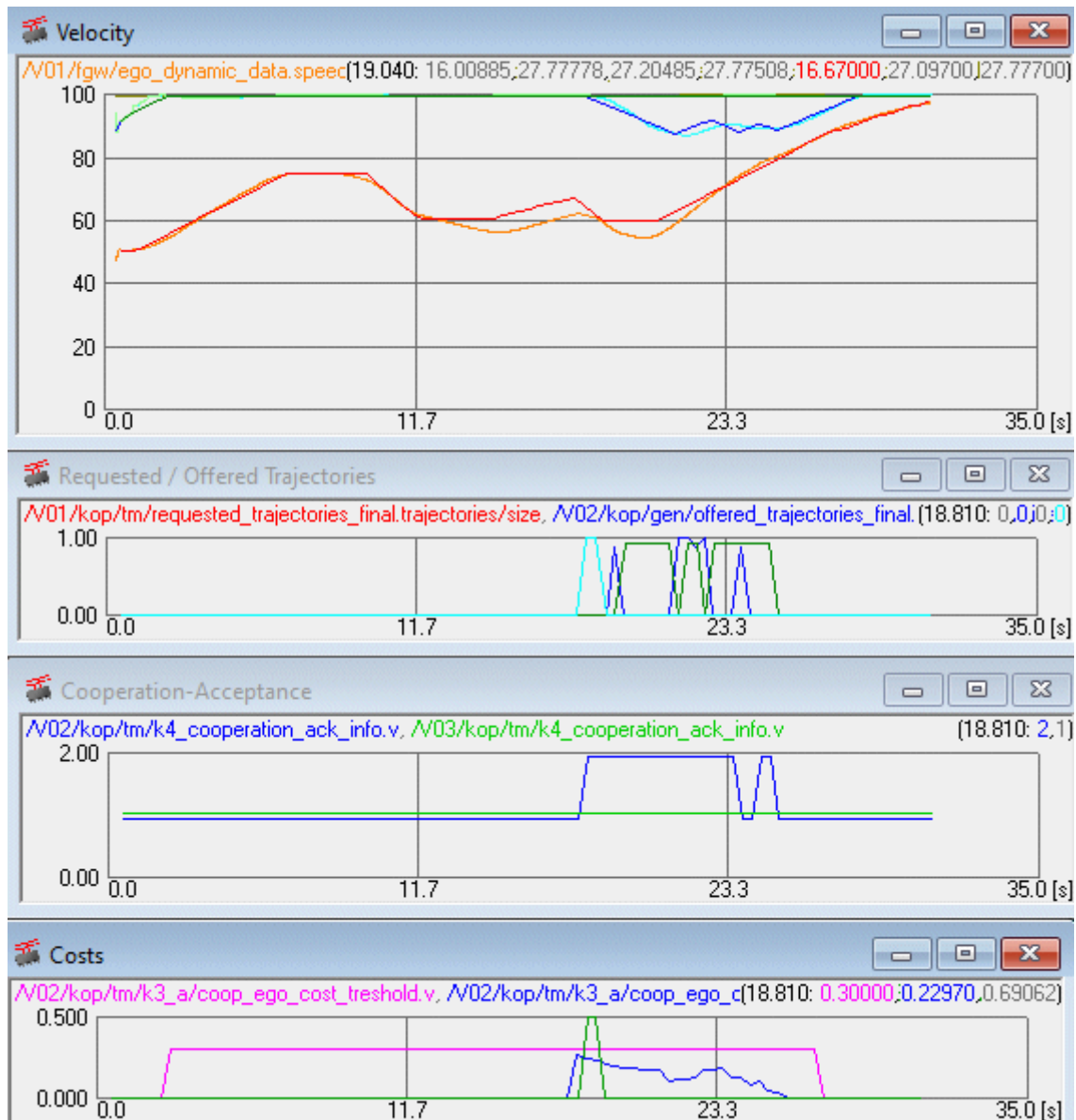


Abbildung 49: Geschwindigkeitsverlauf "fast erzwungene Kooperation" Messung F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-20-20-06-54_short_forced.bag

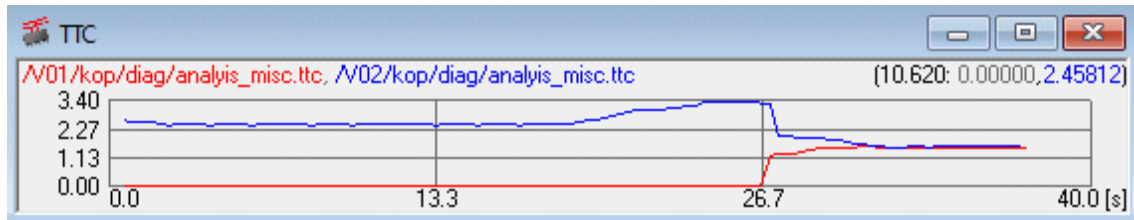


Abbildung 50: Time-to-collision für das Szenario

4.1.8 Erzwungene Kooperation / Unterschiedliches Situationsverständnis

Die Reduktion des Sicherheitsabstandes durch R beim Einfädeln kann so weit gehen, dass dem Fahrzeug B durch R quasi eine Kooperation aufgezwungen wird. Denn wenn das Fahrzeug B auf der Hauptfahrbahn seinen normalen Abstand $\geq 2\text{sec}$ hält, dann kann der Einfädler - wenn er $\leq 1\text{sec}$ in diesem Moment für ausreichend sicher hält - in die Lücke zwischen B und O problemlos einfädeln. Das Fahrzeug auf der Hauptfahrbahn könnte es nur verhindern, indem es seinerseits den Abstand zum Vorderfahrzeug im Vorfeld verringert. Da die Situation für den Einfädler R konfliktfrei erscheint, sendet er keine Bedarfstrajektorie. Fahrzeug B erkennt dessen Absicht immerhin **frühzeitig** aus der Bezugstrajektorie und kann/muss dann darauf angemessen reagieren. Diesen Fall kann man auch als ein Beispiel für ein unterschiedliches Situationsverständnis verstehen: R und B sind sich zwar über die Vorfahrtsregeln einig, aber nicht über weiterführende Regeln, wie die situativ als sicher empfundenen Fahrzeugabstände.

Die Auswirkung einer solchen Situation ist im nächsten Bild zu sehen. Hier wurde die Konfiguration so geändert, dass B eine (sehr große) Soll-TTC von 3.5sec hat, während R nur eine von 1.3sec einhalten muss. Man kann im Diagramm ($t=17.9\text{sec}$) sehen, dass die Kosten von B bei der impliziten "Anfrage" von R die Schwelle überschreiten. B geht folglich nicht auf eine Kooperation ein und behält seine Geschwindigkeit bei.

Da R aufgrund seiner eigenen Einschätzung ebenfalls bei seinem Plan bleibt, bleibt B ab $t=25.3\text{sec}$ keine andere Möglichkeit mehr (genauer: Der Manöverplaner findet keine anderen kollisionsfreien Lösungen.) als zu bremsen und R die gewünschte Trajektorie zu ermöglichen. Über die Anpassung der Bezugstrajektorie wird R dies mitgeteilt. Dies stellt für B eine erzwungene Kooperation dar, da B keine andere Alternative hat. Aus Sicht von R ist es eine unnötige Kooperation.

Als Vorteil des Konzeptes ist hier zu sehen, dass durch die fortwährend ausgetauschten Bezugstrajektorien jederzeit in allen beteiligten Fahrzeugen die Absicht der anderen bekannt wird. Somit kann die Situation letztlich ohne extreme oder gar gefährliche Fahrmanöver gelöst werden - obwohl die Fahrzeuge ein unterschiedliches Verständnis oder Interpretation der Ausgangssituation hatten.

Extreme Beispiele, wie z. B. ein unterschiedliches Verständnis der Vorfahrtsregeln (Kreuzung mit rechts-vor-links-Verständnis vs. Vorfahrt-achten-Verständnis) ließen sich mit der vorhandenen Implementierung leider nicht simulieren, sollten aber in gleicher Weise von dem Konzept profitieren.

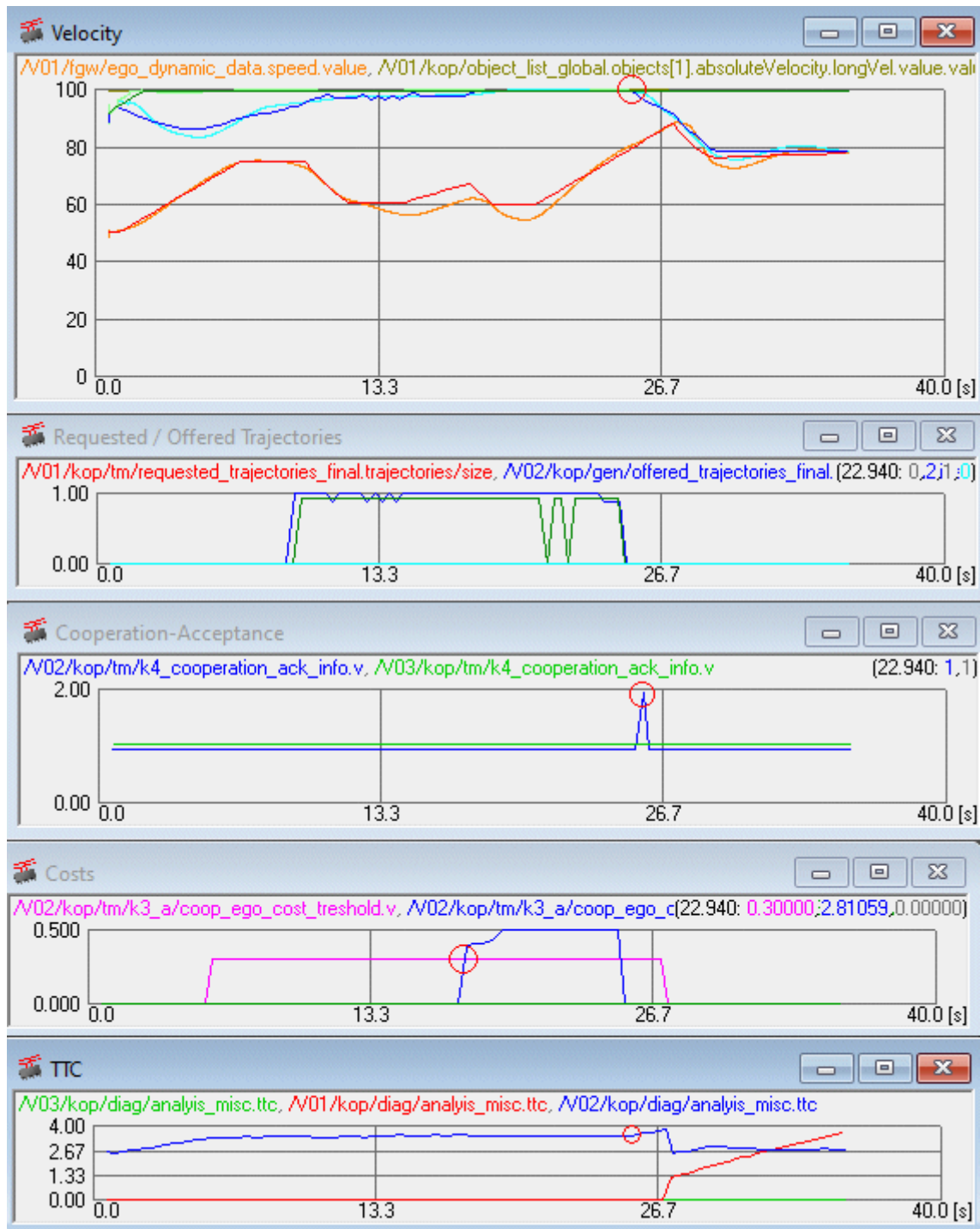


Abbildung 51: Messung "erzwungene Kooperation" F1_Scenario3_Traffic_Standstill_2021-12-21-17-19-27_forced.bag

4.1.9 Kooperationsbereiche für ausgewählte Szenarien

Bei einer Kooperation schafft ein Partner freien Manöverraum für einen anderen Partner, der eine Kooperation anfragt. In vielen Fällen steht dafür als Möglichkeit nur die zeitweise Reduktion der eigenen Geschwindigkeit als Mittel zur Verfügung. Die realistischen Möglichkeiten für das

kooperationsgewährende Fahrzeug sind dabei begrenzt, wenn seine aufgewendeten Kosten überschaubar bleiben sollen. Am Beispiel des Linksabbieger-Szenarios wird gezeigt, was das bei der aktuellen Implementierung des Manöverplaners mit der aktuellen Konfiguration bedeutet.

Es wurde das CarMaker-Szenario F5_Scenario1 verwendet. Es besteht aus einem abbiegenden Fahrzeug R und einem kooperationsgewährenden Fahrzeug B (in der Simulation V02 benannt), das von links kommt. Die Geschwindigkeit war 70 km/h auf der Hauptfahrbahn und 60km/h für den Linksabbieger. Der Einfachheit halber wurde nur die Startposition von B variiert. Die Ergebnisse sind sinngemäß übertragbar. Ausgewertet wurde, ob eine aktive Kooperation stattfand. Dies bedeutet, dass B aktiv verzögert hat, um R sein Manöver zu ermöglichen. Wenn B nicht verzögert hat, hat es entweder R sein Manöver verweigert oder B war de facto dadurch nicht betroffen. Die kooperative Abstimmung zwischen den Fahrzeugen fand für B ca. 20sec vor dem Erreichen der Kreuzung statt.

Es ergab sich, dass bei einer Variation der Startposition von B im Bereich von 480m bis 520m eine aktive Kooperation stattfand. Die entspricht bei 70kmh umgerechnet 2.1sec. Das bedeutet, dass B in den 20sec bereit war, maximal 2.1sec zusätzlichen Manöverraum für R zu schaffen. Dabei sank die Geschwindigkeit von B während der 20sec bis auf 60kmh ab.

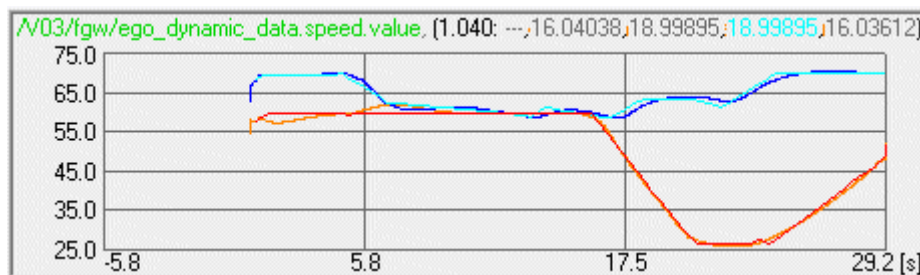


Abbildung 52: Geschwindigkeitsverlauf bei maximal akzeptierten Kosten für den Gewährenden bei kreuzendem Verkehr

Das gleiche wurde für das Szenario F5_Scenario2 wiederholt, bei dem das kooperationsgewährende Fahrzeug B von rechts kommt, also beide Fahrzeuge anschließend in gleicher Richtung fahren. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge wurde dabei angeglichen um den Einfluss der Weiterfahrt zu eliminieren. Die Trajektorie von R war so lang, dass dessen Beschleunigungsphase hinter der Kreuzung mit enthalten war.

Es ergab sich ein Bereich der Startposition von B für aktive Kooperation von 555m bis 600m. Dies entspricht einem Zeitintervall für eine mögliche Kooperation von umgerechnet 2,7sec. Die Geschwindigkeit von B sinkt auch hier um maximal 10kmh ab.

Die zwei Beispiele zeigen, dass der Bereich, indem zwei konkrete Fahrzeuge kooperativ zusammenarbeiten können, nicht sehr groß ist. Somit sind erlebbare Vorteile einer kooperativen Manöverplanung mehr im Bereich voller Straßen zu sehen.

Des Weiteren zeigt sich, dass die Möglichkeiten, jemandem durch eine freiwillige Kooperation zu helfen, nicht sehr groß sind. Trotz einer Abstimmung von 20sec vor der eigentlichen Konfliktzone, kann ein Fahrzeug mit der im Beispiel gewählten Konfiguration gerade einmal 2sec oder 10% zusätzlichen Manöverraum schaffen. In der Praxis wird es vermutlich noch weniger sein, da die energiesparendste Methode zur freiwilligen Verzögerung des eigenen Fahrzeugs darin besteht, es ausrollen zu lassen (gilt für Verbrenner). Hierbei sind geringere Verzögerungen erzielbar, als die, die in der verwendeten Implementierung konfiguriert sind (1.2m/s^2).

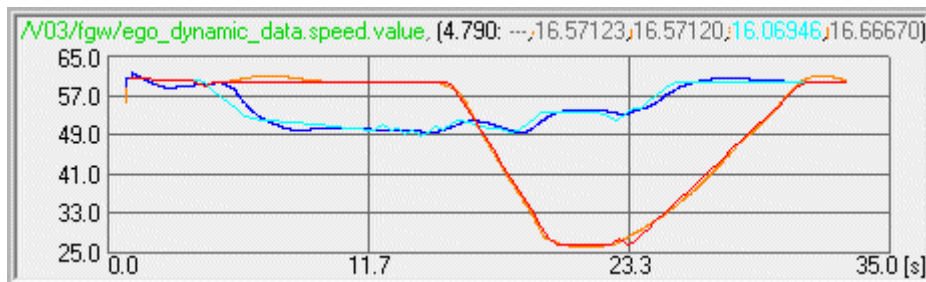


Abbildung 53: Geschwindigkeitsverlauf bei maximal akzeptierten Kosten für den Gewährenden bei Verkehr in gleicher Richtung

4.1.10 Auswirkung / Nutzen einer Kooperation für das Gesamtsystem aller Fahrzeuge

Hier sei auf die [Arbeiten](#) des Projektpartners OPEL verwiesen, die in einem späteren Kapitel dargelegt werden. Die Kooperationskonzepte sind diesbezüglich ähnlich genug, so dass die Ergebnisse übertragbar sind.

4.1.11 Herausforderung: Gleichzeitige Kooperation vieler Fahrzeuge

Dieser Fall konnte mit den gegebenen Mitteln leider nicht evaluiert werden. Die Implementierung des Manöverplaners war aufgrund beschränkter Ressourcen darauf ausgelegt, einem Fahrzeug eine Kooperation zu ermöglichen. Bei mehreren Fahrzeugen, die in einer abhängigen Situation gleichzeitig eine ähnliche Kooperation benötigen, entstehen andere Bedingungen. Falls z. B. um ein Fahrzeug auf die Autobahn einfädeln zu lassen, 2sec zusätzlicher Manöverraum geschaffen werden müsste, dann wären es bei zwei Einfädelern hintereinander schon 4sec. Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, ist das mit der derzeit verfügbaren Implementierung, die auf komfortable Kooperation ausgelegt ist, nicht darstellbar. Im realen Straßenverkehr würden hier stärkere Geschwindigkeitsverzögerungen mit verkürzten Abständen in Kauf genommen werden (Vorstufe des Reißverschluss-Prinzips). Es entsteht eine neue Situation, die in der Implementierung nicht vorgesehen war.

Zudem enthält die Architektur des implementierten Manöverplaners eine exponentielle Abhängigkeit der benötigten Ressourcen von der Anzahl der berücksichtigten Fremdobjekte, so dass nicht mehr als 3-4 relevante Objekte gleichzeitig einbezogen werden konnten. Optimierungs-

maßnahmen ließen sich im Rahmen des Projektes nicht mehr umsetzen. Daher muss die experimentelle Analyse durch die gegenseitige Beeinflussung von parallel laufenden Kooperationen der weiteren Forschung überlassen werden.

Als eine wertvolle Optimierungsmaßnahme hat sich immerhin die Verwendung von Alternativtrajektorien erwiesen. Statt für jedes andere Fremd-Fahrzeug eine Betrachtung über dessen Situation und sich daraus ergebene mögliche Zugeständnisse zu machen, wurden vielfach die empfangenen Alternativtrajektorien verwendet. Dies sparte Rechen-Ressourcen und Aufwand. Dabei wurde typischerweise eine einzige Alternativtrajektorie von zur Kooperation bereiten Fahrzeugen bereitgestellt.

4.2 Konzeptverifikation Bosch

Bosch verfolgt das mit IMAGinE 2018 bezeichnete Kooperationskonzept, das maßgeblich von Continental und Bosch entwickelt und spezifiziert wurde. Parallel zu der durch den GUA1 erfolgten Umsetzung mit den durch Continental vorgenommenen Weiterentwicklungen (IMAGinE Umsetzung) hat Bosch auch eine eigene Umsetzung für die Funktion F1 (kooperatives automatisiertes Einfädeln) vorgenommen, die auf einem neu konzipierten graph-basierten Planner basiert. Für die Erprobung und Verifikation wurden beide Implementierungen in der Simulationsumgebung sowie den Bosch-Testfahrzeugen in Betrieb genommen. Die Erprobung und Verifikation des Kooperationskonzepts für F1 und F5 (kooperatives automatisiertes Abbiegen) erfolgte gemeinsam mit den Partnern unter Verwendung der IMAGinE-Umsetzung. Da die zugehörige Konzeptverifikation bereits von Continental ausführlich beschrieben wurde, wird an dieser Stelle lediglich darauf verwiesen. Nachfolgend wird die Konzeptverifikation für die Bosch eigene Umsetzung beschrieben.

Bewertungsmetriken für die Manöverabstimmung

Folgende Bewertungsmetriken wurden definiert, um den Erfolg der Manöverabstimmung zu quantifizieren:

- Reference trajectory ratio – Diese Metrik gibt das Verhältnis der Abtastzeitpunkte in einem Simulationsdurchlauf an, in denen eine Referenztrajektorie berechnet werden konnte, zu der Gesamtzahl der Abtastzeitpunkte des Simulationsdurchlaufs.
- Request trajectory ratio – Diese Metrik gibt das Verhältnis der Abtastzeitpunkte in einem Simulationsdurchlauf an, in denen eine Bedarfstrajektorie berechnet werden konnte, zu der Gesamtzahl der Abtastzeitpunkte des Simulationsdurchlaufs.
- Reference trajectory cost – Diese Metrik trackt die Kosten der berechneten Referenztrajektorien während eines Simulationsdurchlaufs.
- Request trajectory cost – Diese Metrik trackt die Kosten der berechneten Bedarfstrajektorien während eines Simulationsdurchlaufs.

Die Metrik „Reference trajectory ratio“ liefert eine Aussage über die Qualität des entwickelten Planners und seiner Echtzeitfähigkeit. Ist dieser Wert nicht bei 1.0, so kann es sein, dass Referenztrajektorien nicht immer berechnet werden, weil entweder der Planner in den betrachteten Szenarien nicht immer funktioniert oder weil die Berechnungen länger als ein Samplingintervall dauern. Letzteren Aspekt können wir in Simulation ausblenden, indem wir die Simulationssgeschwindigkeit reduzieren. Außerdem muss bei der Auswertung der Metrik berücksichtigt werden, dass der Planner nach dem Start der Simulation eine Burn-In-Phase hat und somit Reference trajectory ratio < 1.0 sein kann, wenn diese ignoriert wird.

Die Metrik „Request trajectory ratio“ liefert eine Aussage darüber, ob und wie lange die Abstimmung einer Kooperation stattfindet. Damit die Metrik aussagekräftig wird, muss sie im Einklang mit simulierten Szenarien interpretiert werden: Liegt ein Szenario vor, in dem keine Kooperation notwendig ist, so muss „Request trajectory ratio“ Null bleiben. Bei einem Szenario mit Kooperationsbedarf muss „Request trajectory ratio“ entsprechend größer Null sein. Außerdem ist es hilfreich, einen gleitenden Mittelwert innerhalb eines Simulationsdurchlaufes zu betrachten, um aussagen zu können, wann und wie lange in der Simulation eine Kooperation ausgehandelt wird. Eine solche Differenzierung ist beim Einstellen der Planner- und Abstimmungsparameter hilfreich.

Die beiden Metriken „Reference trajectory cost“ und „Request trajectory cost“ werden in erster Linie unterstützend für die Einstellung der Parameter in der Manöverplanung und -abstimmung genutzt. Außerdem bilden sie ab, welchen Vorteil gemessen an der Summe der Kosten der Referenztrajektorien von beteiligten Fahrzeugen eine erfolgreiche Kooperation bringt.

Neben den bisher beschriebenen Metriken wird getrackt, in wie vielen Simulationsdurchläufen relativ zur Gesamtzahl aller Simulationsdurchläufe es zu einer Kollision zwischen den simulierten Fahrzeugen kommt. Wir weisen diese Metrik nachfolgend nicht explizit aus, da es im aktuellen Stand der Entwicklung zu keinen Kollisionen kommt, und das unabhängig davon, ob eine Kooperation stattfindet oder nicht.

Vorläufige Ergebnisse der Evaluation in Simulation

Nachfolgend werden einige Ergebnisse der Evaluation der Funktion F1 in Simulation vorgestellt. Die dafür eingesetzte Simulationsumgebung besteht aus einer dynamischen Kopplung der Fahrdynamiksimulation *CarMaker* zum Bosch Software-Stack. Um die Ergebnisse der Simulationen richtig interpretieren zu können, wurde ein Visualisierungstool entwickelt. Dieses Tool erlaubt die graphische Darstellung ([s. nachfolgende Abbildung](#)) der simulierten Fahrzeuge, der Karte, der von jedem Fahrzeug berechneten kollisionsfreien Trajektorien (Linien), der ausgewählten Referenztrajektorien (Kreuze) und Bedarfstrajektorien (Kreise) sowie deren Kosten. Als Ergebnis wird ein Video generiert, wo die zeitliche Entwicklung der Fahrzeuge und der Trajektorien dargestellt wird.

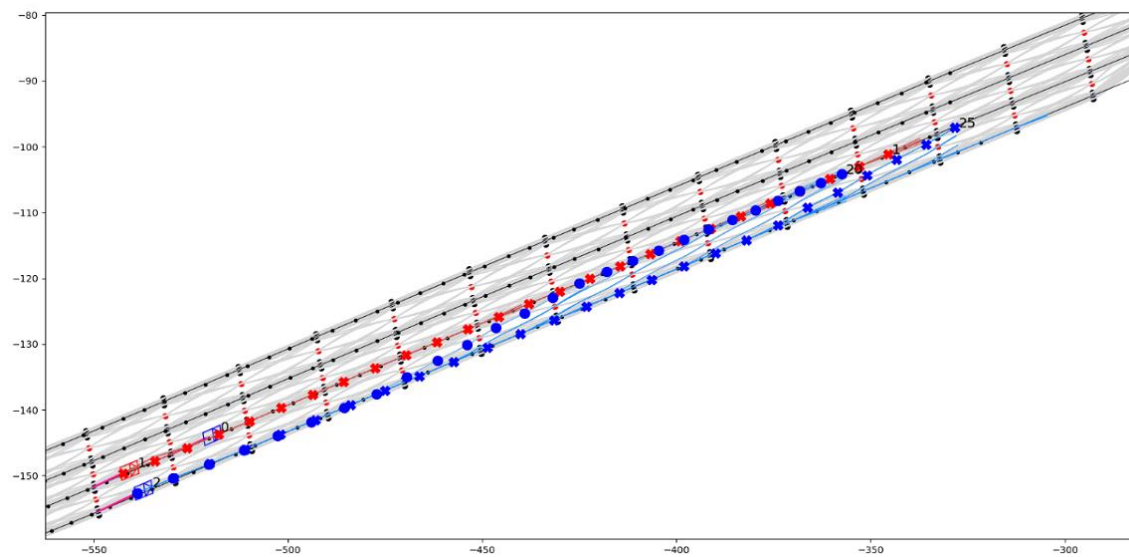


Abbildung 54: Visualisierung der berechneten kollisionsfreien Trajektorien (Linien), der ausgewählten Referenztrajektorien (Kreuze) und Bedarfstrajektorien (Kreise) sowie deren Kosten.

Darüber hinaus haben wir proprietäres Bewertungstooling implementiert, welches u. a. eine Grid-Suche für die Parameter in der Manöverplanung und -Abstimmung ermöglicht. Dieses Tool erlaubt die Bewertung der Manöverabstimmung anhand der o. g. Metriken, wenn einzelne Parameter variiert werden. Exemplarisch wurden folgende Parameter untersucht:

- **Traj_duration:** Dauer der berechneten Trajektorien
- **Velocity_step:** Größe der Zielgeschwindigkeitsschritte, in denen Trajektorien gesampelt werden
- **Maximum_cost_request_trajectories:** Kostenschwelle, ab der eine Bedarfstrajektorie in der MCM versendet wird (relativ zu den Kosten der Referenztrajektorie)

Nachfolgend werden die Metriken reference trajectory ratio und request trajectory ratio für das Fahrzeug Vhcl01 (Einfädler) in Abhängigkeit vom velocity_step (von 2 bis 8 m/s) dargestellt. Das reference trajectory ratio bleibt über 99% unabhängig vom velocity step, was darauf hinweist, dass die Referenztrajektorie in allen Fällen korrekt berechnet wird. Die Metrik request trajectory ratio variiert hingegen zwischen 0 und 10% je nach velocity step. Dies deutet darauf hin, dass die Parameterwerte 4 bis 6 m/s eine schnellere Einigung bei der Manöverabstimmung ermöglichen. Diese sind deshalb bei der Manöverplanung zu bevorzugen.

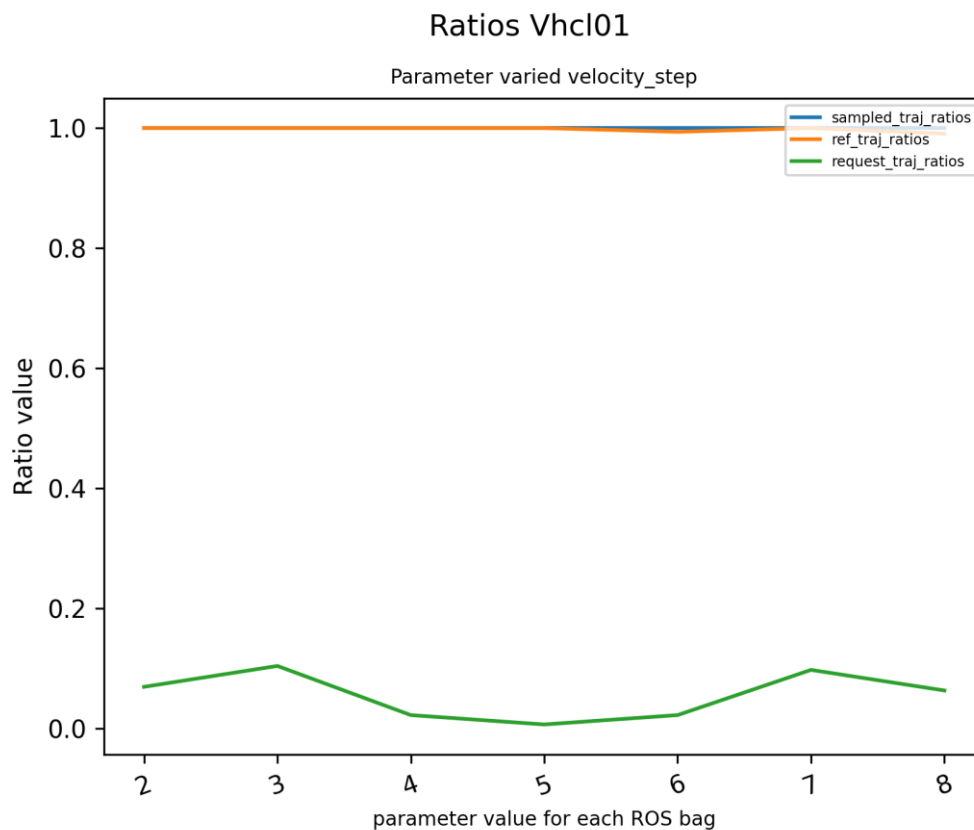


Abbildung 55: Reference trajectory ratio und request trajectory ratio in Abhängigkeit von velocity_step

[Das nächste Bild](#) zeigt die durchschnittlichen Kosten der Referenz- und Bedarfstrajektorien vom Einfädler in Abhängigkeit von der Trajektoriendauer (von 4 bis 14 Sekunden). Man sieht eindeutig, dass längere Referenztrajektorien höhere Kosten haben, da der Einfädler auf der Beschleunigungsspur bleiben muss, solange die Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn der Kooperation nicht zugestimmt haben. Die Kosten der Bedarfstrajektorien bleiben hingegen relativ konstant, da diese auf die Hauptspur wechseln ([s. Abbildung oben](#)).

Total Average(ref_traj_cost and request_traj_cost) w.r.t each bagfile

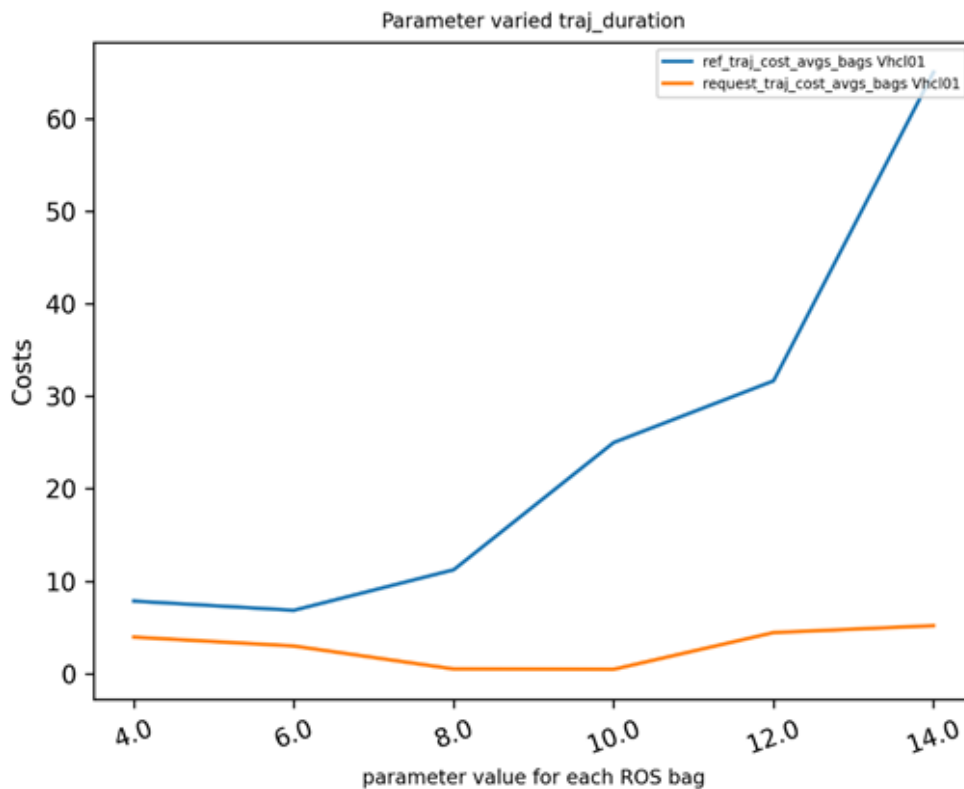


Abbildung 56: Durchschnittskosten der Referenz- und Bedarfstrajektorien in Abhängigkeit vom Trajektoriendauer

Anschließend werden die Kosten der Referenz- und Bedarfstrajektorien für beide Fahrzeuge (Vhcl00: kooperierendes Fahrzeug auf der Hauptfahrbahn, Vhcl01: Einfädler) über die Zeit [dar- gestellt](#). Die Simulation wurde für unterschiedliche Werte vom Parameter maximum_cost_request_trajectories (von 0,7 bis 0,95) wiederholt. Während für einige Parameterwerte die Trajektorienkosten durchgängig niedrig bleiben (d. h. die Fahrzeuge fahren ihre gewünschten Trajektorien), steigen die Kosten der Referenztrajektorie des kooperierenden Fahrzeugs für andere Werte zeitweise stark, was darauf hinweist, dass dieses zu stark bremsen musste.

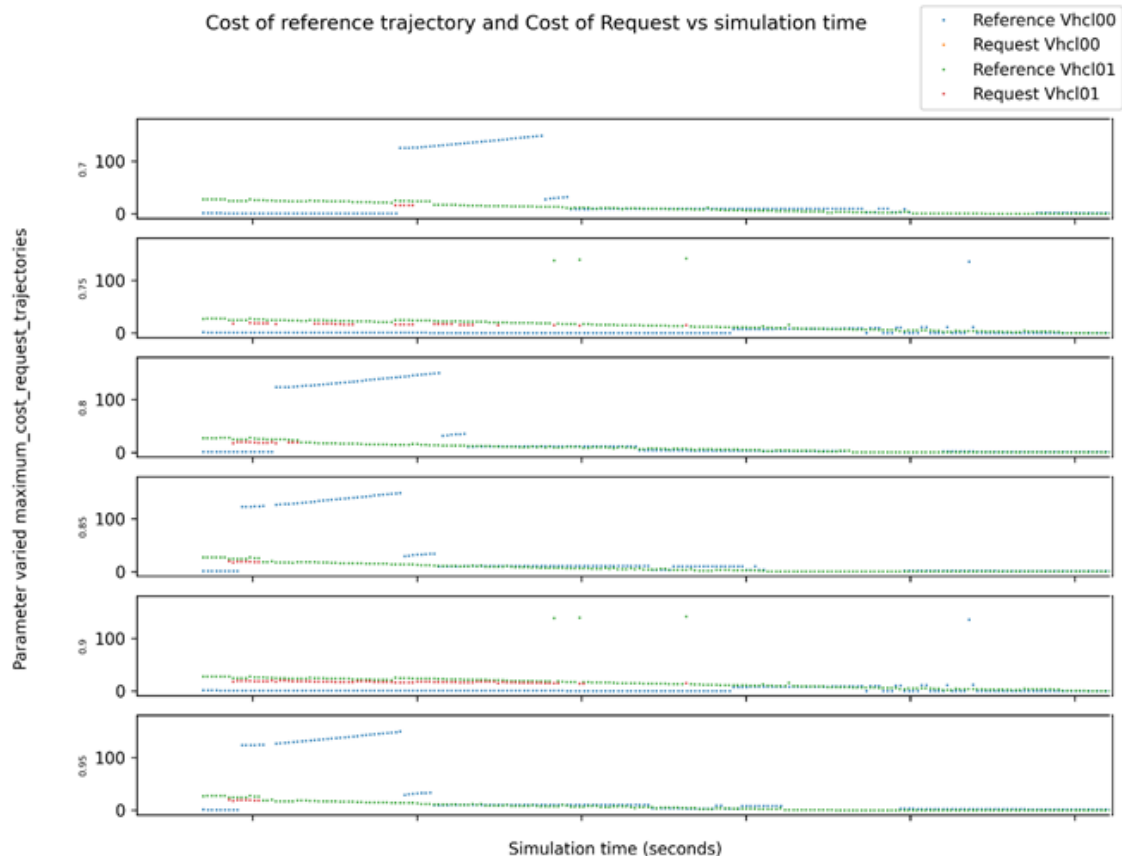


Abbildung 57: Kosten der Referenz- und Bedarfstrajektorien in Zeitablauf in Abhängigkeit vom Schwellenwert für die Auswahl der Bedarfstrajektorien

Anhand dieser Ergebnisse wurde die Parametrierung des Moduls "Manöverplanung und -abstimmung" optimiert, um die Erfolgswahrscheinlichkeit der Kooperation zu erhöhen. Außerdem werden diese Simulationsergebnisse durch Messungen mit Versuchsfahrzeugen auf der Teststrecke validiert.

4.3 Konzeptverifikation Volkswagen

4.3.1 Verifikation Funktion F1 und Kooperativer Manöverplaner

Im Folgenden wird beschrieben, wie der partnerspezifische kooperative Manöverplaner anhand der IMAGinE-Funktion F1 („kooperatives Einfädeln“) verifiziert wurde. Im Rahmen der Verifikation sollte überprüft werden, ob das System entsprechend der in Deliverable D2.5 spezifizierten Funktionsweise lauffähig ist. Dazu soll ein kooperatives Einfädel-Szenario (F1) mit drei unterschiedlichen Parametersätzen simuliert werden. Damit soll überprüft werden, ob das zu erwartende kooperative Verhalten beobachtet werden kann. Dabei soll auch verifiziert werden, ob der zeitliche Verlauf der ausgetauschten MCM den Erwartungen entsprechen.

Zur Verifikation des Systems wurde eine Einfädelsituation mit den zwei kooperativ-ausgerüsteten Fahrzeugen V01 und V02 betrachtet, die in Abbildung 58 dargestellt ist. Die Situation ist

dabei so gestaltet, dass beide Fahrzeuge die gleiche Zielgeschwindigkeit haben, sodass V01 neben V02 die Einfädelspur erreicht. V01 muss also, um auf die Autobahn aufzufahren, abbremesen oder mit V02 kooperieren. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die drei Parametersätze der kooperativen Manöverplaner sowie über das zu erwartenden Verhalten von V01 und V02.

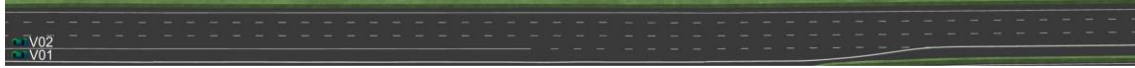


Abbildung 58: Für die Verifikation verwendete Einfädelsituation mit den kooperativ-ausgerüsteten Fahrzeugen V01 und V02. Um die Kosten für ein Abbremesen auf der Einfädelspur zu variieren, startet V01 je nach Szenario etwas vor oder hinter V02.

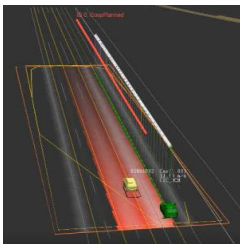
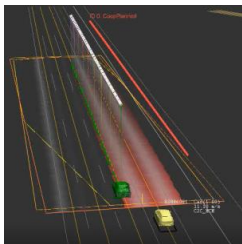
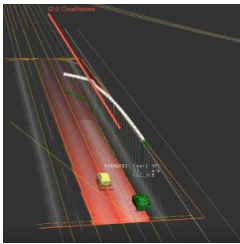
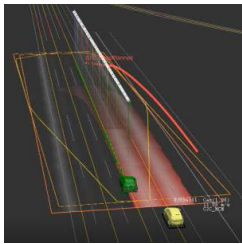
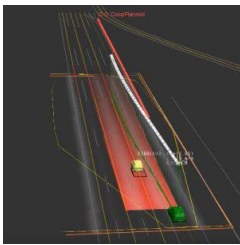
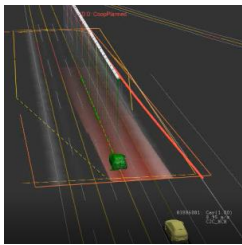
Tabelle 2: Drei Parametersätze zur Verifikation des kooperativen Manöverplaners sowie des zu erwartenden Verhaltens von V01 und V02.

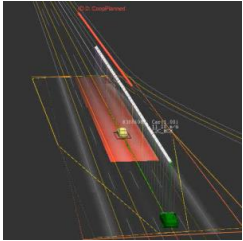
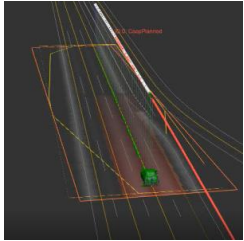
Parametersatz	V01 MinCR	V02 MaxCI	Erwartetes Verhalten V01	Erwartetes Verhalten V02
1	hoch	(irrelevant)	- aufgrund der Parametrisierung mit einem hohen Wert für das MinCR überschreitet die Kostendifferenz der Interims-Trajektorien I-AK und I-NK das MinCR nicht - daher äußert V01 in diesem Durchgang keine Wünsche - somit muss V01 abbremsen und hinter V02 auf die Autobahn auffahren	da V02 keine Wünsche erhält, behält V02 seine Plan-Trajektorie bei und führt keinen Spurwechsel durch
2	niedrig	niedrig	- aufgrund der Parametrisierung mit einem niedrigen Wert für das MinCR überschreitet die Differenz der Interims-Trajektorien I-AK und I-NK das MinCR, sobald ein Spurwechsel möglich ist - daher äußert V01 in diesem Durchgang Wünsche - da V02 diese Wünsche kontinuierlich ablehnt, muss V01 abbremsen und hinter V02 auf die Autobahn auffahren	- V02 empfängt Wunsch-Trajektorien von V01 - aufgrund der Parametrisierung mit einem niedrigen Wert für das MaxCI überschreitet die Differenz der Interims-Trajektorien I-AK und I-PK das MaxCI - daher lehnt V02 die eingehenden Wünsche kontinuierlich ab, behält seine Plan-Trajektorie bei und führt keinen Spurwechsel durch
3	niedrig	hoch	- aufgrund der niedrigen Parametrisierung des MinCR-Wertes überschreitet die Differenz der Interims-Trajektorien I-AK und I-NK das MinCR, sobald ein Spurwechsel möglich ist - daher äußert V01 in diesem Durchgang Wünsche - da V02 den Einfädel-Wunsch akzeptiert, kann V01 ohne abzubremsen neben V02 auf die Autobahn auffahren	- V02 empfängt Wunsch-Trajektorien von V01 - aufgrund der niedrigen Parametrisierung des MinCR-Wertes unterschreitet die Differenz der Interims-Trajektorien I-AK und I-PK das MaxCI - somit akzeptiert V02 den eingehenden Wunsch, macht die I-AK zu seiner neuen Plan-Trajektorie und führt einen Spurwechsel auf die linke Fahrspur durch

Beobachtetes Verhalten mit Parametersatz 1:

Im Rahmen der Verifikation des Systems wurden Videos jeweils aus der Planer-Ansicht von V01 und V02 mitgeschnitten. Einzelne Frames dieser Videos sind in Tabelle 3 dargestellt. In der Tabelle wird auch das beobachtete Verhalten von V01 und V02 beschrieben. Das Verhalten entspricht dabei den Erwartungen des Parametersatzes 1 entsprechend der Tabelle 2.

Tabelle 3: ADTF-Ansichten der Planer von V01 und V02 bei einem Durchlauf mit dem Parametersatz 1. Das grüne Fahrzeug stellt jeweils das Ego-Fahrzeug der jeweiligen Planer-Instanz dar. Die z-Koordinate der Trajektorien ist ein Maß für die Geschwindigkeit.

Simulationszeit (s)	ADTF-Planer Ansicht V01	ADTF-Planer Ansicht V02	Beobachtetes Verhalten V01 & V02
4 s			- Sowohl V01 als auch V02 generieren eine Plan-Trajektorie (hier weiß) und senden diese als MCM-Nachricht an das jeweils andere Fahrzeug. - Sowohl V01 als auch V02 erhalten als MCM die Plan-Trajektorie des jeweils anderen Fahrzeuges (hier dunkelorange) und stellen diese korrekt dar. - Da zu Beginn des Szenarios die Fahrbahnmarkierung des Einfädelstreifens durchgezogen ist, plant V01 noch keinen Spurwechsel.
10 s			- Sobald die durchgezogene Linie des Einfädelstreifens endet, plant V01 einen Spurwechsel auf die Autobahn (weiße Trajektorie). - Am Absinken der Trajektorie lässt sich erkennen, dass V01 dazu plant, seine Geschwindigkeit zu reduzieren und hinter V02 einzufädeln. - V01 generiert zu diesem und auch zu keinem darauf folgenden Zeitpunkt eine Wunsch-Trajektorie. - V02 erhält die neue Plan-Trajektorie von V01, muss aber seine eigene Plan-Trajektorie nicht anpassen, da diese nicht mit dem Plan von V01 kollidiert.
18 s			- Einige Sekunden später hat V01 bereits soweit abgebremst, dass es beginnt die Spur zu wechseln. - V02 fährt und plant weiter auf der rechten Spur der Autobahn.

Simulationszeit (s)	ADTF-Planer Ansicht V01	ADTF-Planer Ansicht V02	Beobachtetes Verhalten V01 & V02
30 s			- Einige Sekunden später hat V01 erfolgreich auf die Autobahn hinter V02 eingefädelt. - V02 fährt und plant weiter auf der rechten Spur der Autobahn.

Um festzustellen wie reproduzierbar das Verhalten von V01 und V02 ist, wurde das Szenario mit diesem Parametersatz dreifach wiederholt durchlaufen. In Abbildung 59 sind die abgefahrenen Trajektorien dieser drei Durchläufe für V01 und V02 als lokale Koordinaten relativ zur Straße dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass V02 in keinem der Durchläufe einen Spurwechsel durchgeführt hatte, um V01 auf die Autobahn einfädeln zu lassen. Die abgefahrenen Trajektorien von V01 variieren zwischen den Durchläufen leicht. Die Variationen entsprechen aber den typischen Abweichungen der nicht-deterministischen Planungscharakteristik des Volkswagen-Manöverplaners. Darüber hinaus sind in Abbildung 60 alle Wunsch-Trajektorien von V01 dargestellt sowie alle kooperativen Antworten auf Wunsch-Trajektorien seitens V02. Wie erwartet wurden in den drei Durchläufen von V01 keine Wunsch-Trajektorien versendet.

V01 & V02 Trajektorien als lokale Koordinaten relativ zur Straße

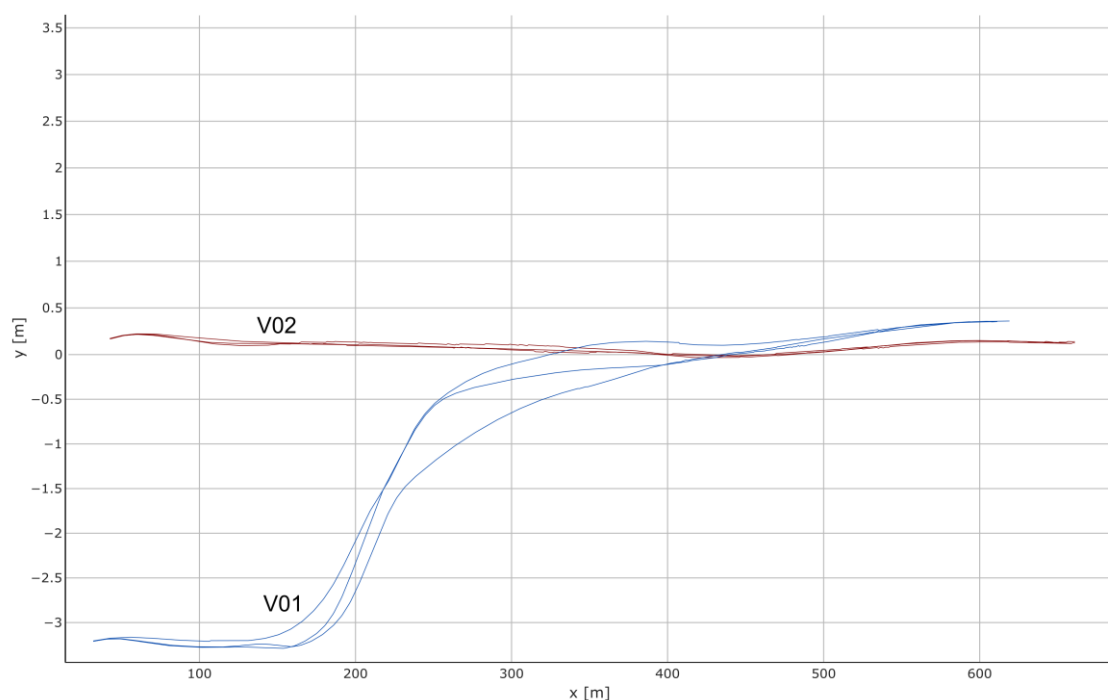


Abbildung 59: Lokale Koordinaten relativ zur Straße der Trajektorien von V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 1.

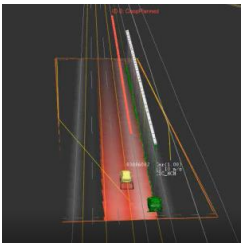
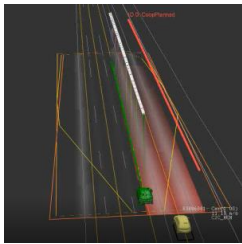
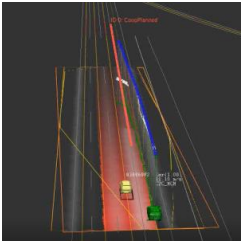
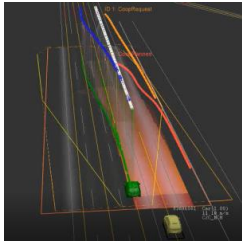


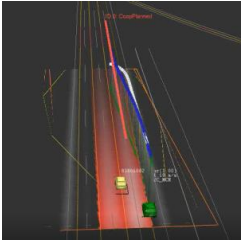
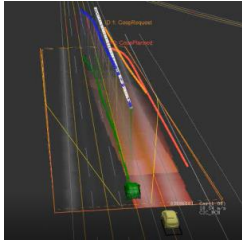
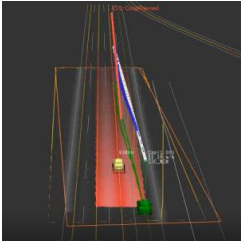
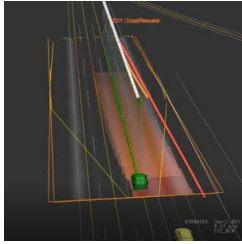
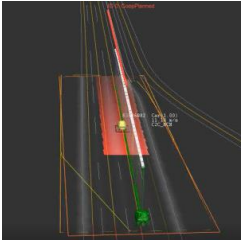
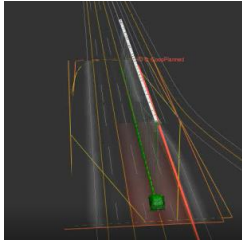
Abbildung 60: Ergebnisse der kooperativen Manöverabstimmung zwischen V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 1. Es ist zu erkennen, dass, wie erwartet, keine Wunsch-trajektorien versendet wurden.

Beobachtetes Verhalten mit Parametersatz 2:

Entsprechend dem Vorgehen mit Parametersatz 1 wurden auch für den Parametersatz 2 Videos aus der Planer-Ansicht von V01 und V02 mitgeschnitten. Ausschnitte dieser Videos sowie das beobachtete Verhalten von V01 und V02 sind in Tabelle 4 dargestellt. Auch hier entspricht das Verhalten dabei den Erwartungen des Parametersatzes 2 entsprechend der Tabelle 2.

Tabelle 4: ADTF-Ansichten der Planer von V01 und V02 bei einem Durchlauf mit dem Parametersatz 2. Das grüne Fahrzeug stellt jeweils das Ego-Fahrzeug der jeweiligen Planer-Instanz dar.

Simulationszeit (s)	ADTF-Planer Ansicht V01	ADTF-Planer Ansicht V02	Beobachtetes Verhalten V01 & V02
4 s			- Sowohl V01 als auch V02 generieren eine Plan-Trajektorie (hier weiß) und senden diese als MCM-Nachricht an das jeweils andere Fahrzeug. - Sowohl V01 als auch V02 erhalten als MCM die Plan-Trajektorie des jeweils anderen Fahrzeuges (hier dunkelorange) und stellen diese korrekt dar. - Da zu Beginn des Szenarios die Fahrbahnmarkierung des Einfädelstreifens durchgezogen ist, plant V01 noch keinen Spurwechsel.
10 s			- Sobald die durchgezogene Linie des Einfädelstreifens endet, plant V01 einen Spurwechsel auf die Autobahn (weiße Trajektorie). - Am Absinken der Trajektorie lässt sich erkennen, dass V01 dazu plant, seine Geschwindigkeit zu reduzieren und hinter V02 einzufädeln. - V01 generiert zu diesem Zeitpunkt zusätzlich eine Wunsch-Trajektorie, die ein Einfädeln bei Beibehaltung der aktuellen Geschwindigkeit enthält (blaue Trajektorie). - In der Planer-Ansicht von V02 ist der Zustand eines darauf folgenden Planungszyklus dargestellt, indem er die Plan- (dunkelorange) und Wunsch-Trajektorie (hellorange) von V01 als MCM erhält. - V02 behält als Plan-Trajektorie (weiß) seinen bisherigen Plan bei und lehnt den Wunsch von V01 somit (indirekt) ab. - Die Interims-Trajektorie I-AK, die V02 zur Beurteilung der eigenen Mehrkosten verwendet hat, wird im Planer von V02 als Evaluations-Trajektorie (blau) dargestellt (aber nicht als MCM versendet).

Simulationszeit (s)	ADTF-Planer Ansicht V01	ADTF-Planer Ansicht V02	Beobachtetes Verhalten V01 & V02
12 s			- V01 behält daher in den darauffolgenden Planungs-Zyklen als Plan-Trajektorien (weiß) ein Abbremsen auf dem Einfädelstreifen bei. - Kontinuierlich generiert V01 weiter Wunsch-Trajektorien (blau), die ein Einfädeln auf die Autobahn bei Beibehaltung der jeweils aktuellen Geschwindigkeit darstellen. - V02 evaluiert kontinuierlich weiter die Wunsch-Trajektorien von V01, lehnt diese jedoch weiterhin aufgrund der niedrigen Parametrisierung des MaxCI ab. - Entsprechend behält V02 weiterhin als Plan-Trajektorie (weiß) die Fahrt auf dem rechten Fahrstreifen der Autobahn bei und stellt die verwendete I-AK als Evaluations-Trajektorie (blau) dar.
15 s			- Einige Sekunden später hat V01 soweit abgebremst, dass es beginnt, hinter V02 auf die Autobahn einzufädeln. - Weiterhin generiert V01 jedoch eine Wunsch-Trajektorie (blau), die gegenüber der Plan-Trajektorie (weiß) noch ein günstigeres Einfädeln auf die Autobahn darstellt, und versendet diese als MCM. - V02 lehnt auch diese Wünsche ab und behält seine Plan-Trajektorie (weiß) bei.
30 s			- Einige Sekunden später ist V01 erfolgreich auf die Autobahn hinter V02 eingefädelt. - Die günstigste Interims-Trajektorie kollidiert nun nicht mehr mit der Plan-Trajektorie von V02, sodass V01 nun keine Wunsch-Trajektorien mehr generiert. - V02 fährt und plant weiter auf der rechten Spur der Autobahn.

Auch mit diesem Parametersatz wurde das Szenario dreifach wiederholt durchlaufen. Abbildung 61 stellt die abgefahrenen Trajektorien dieser drei Durchläufe für V01 und V02 als lokale Koordinaten relativ zur Straße dar. Analog zu den Durchgängen mit dem Parametersatz 1 lässt sich dabei erkennen, dass V02 in keinem der Durchläufe einen Spurwechsel durchgeführt hatte, um Platz für ein Einfädeln von V01 zu machen. Auch hier lassen sich leichte Abweichungen zwischen den Trajektorien von V01 und V02 erkennen, die auf die nicht-deterministischen Planung des Volkswagen-Manöverplaners zurückzuführen sind. Zudem sind in Abbildung 62 alle Wunsch-Trajektorien von V01 dargestellt sowie alle kooperativen Antworten auf Wunsch-Trajektorien seitens V02. Dabei lässt sich erkennen, dass V01 in allen drei Durchgängen ab einem Zeitpunkt von etwa 10 s (Simulationszeit) kontinuierlich Wunsch-Trajektorien als MCM versendet. Ebenso lässt sich erkennen, dass diese Wünsche kontinuierlich von V02 abgelehnt werden. Somit entsprechen auch die Ergebnisse dieser kooperativen Manöverabstimmung den Erwartungen für den Parametersatz 2 aus Tabelle 2.

V01 & V02 Trajektorien als lokale Koordinaten relativ zur Straße

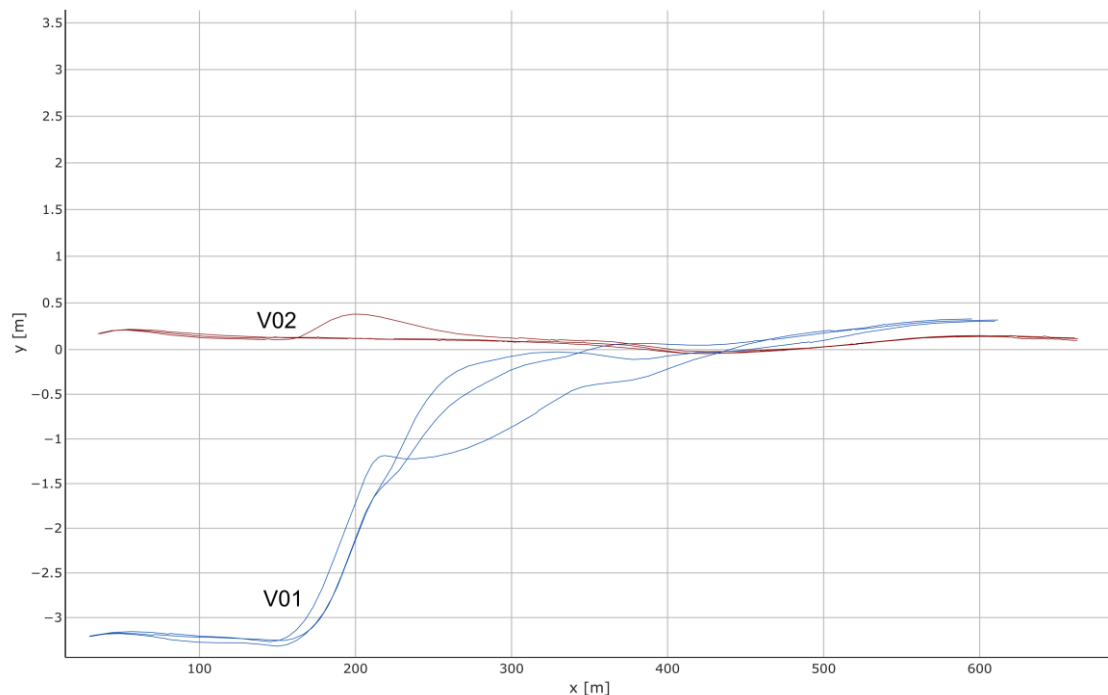


Abbildung 61: Lokale Koordinaten relativ zur Straße der Trajektorien von V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 2

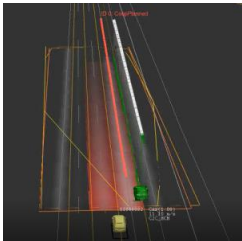
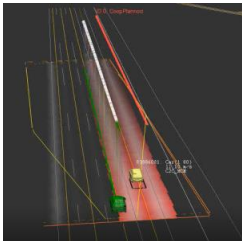
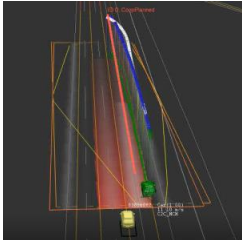
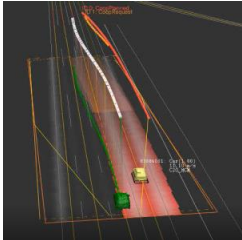


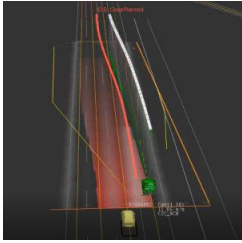
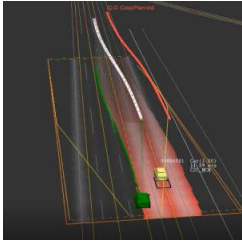
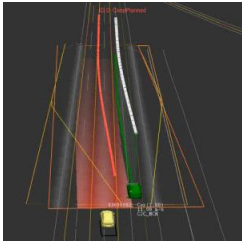
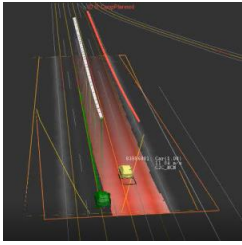
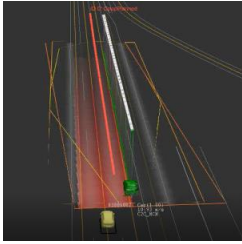
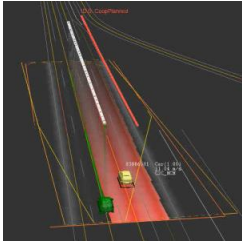
Abbildung 62: Ergebnisse der kooperativen Manöverabstimmung zwischen V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 2

Beobachtetes Verhalten mit Parametersatz 3:

Auch für Parametersatz 3 wurden Videos aus der Planer-Ansicht von V01 und V02 mitgeschnitten. In Tabelle 5 sind Ausschnitte dieser Videos sowie das beobachtete Verhalten von V01 und V02 dargestellt. Wie auch bei den vorherigen Parametersätzen entspricht das beobachtete Verhalten Erwartungen entsprechend der Tabelle 2.

Tabelle 5: ADTF-Ansichten der Planer von V01 und V02 bei einem Durchlauf mit dem Parametersatz 3. Das grüne Fahrzeug stellt jeweils das Ego-Fahrzeug der jeweiligen Planer-Instanz dar.

Simulationszeit (s)	ADTF-Planer Ansicht V01	ADTF-Planer Ansicht V02	Beobachtetes Verhalten V01 & V02
4 s			- V01 und V02 generieren eine Plan-Trajektorie (weiß) und senden diese als MCM-Nachricht an das jeweils andere Fahrzeug. - V01 und V02 erhalten die Plan-Trajektorie des jeweils anderen Fahrzeuges als MCM (hier dunkelorange) und stellen diese korrekt dar. - Da zu Beginn des Szenarios die Fahrbahnmarkierung des Einfädelstreifens durchgezogen ist, plant V01 noch keinen Spurwechsel.
10 s			- Sobald die durchgezogene Linie des Einfädelstreifens endet, plant V01 einen Spurwechsel auf die Autobahn (weiße Trajektorie). - Am vorübergehenden Absinken der Trajektorie lässt sich erkennen, dass V01 dazu plant seine Geschwindigkeit zu reduzieren um hinter V02 einzufädeln. - Da eine Reduzierung der Geschwindigkeit entsprechend der Kosten-Parametrisierung des Planers mit einem Zuwachs an Kosten verbunden ist, generiert V01 zu diesem Zeitpunkt zusätzlich eine Wunsch-Trajektorie, die ein Einfädeln bei Beibehaltung der aktuellen Geschwindigkeit enthält (blaue Trajektorie). - In der Planer-Ansicht von V02 ist der Zustand eines darauf folgenden Planungszyklus' dargestellt, indem es die Plan- (dunkelorange) und Wunsch-Trajektorie (hellorange) von V01 als MCM erhält. - V02 akzeptiert aufgrund der hohen Parametrisierung des MaxCI (indirekt) den Wunsch, indem es die I-AK als neue Plan-Trajektorie (weiß) verwendet, und plant somit einen Wechsel auf die mittlere Fahrspur der Autobahn.

Simulationszeit (s)	ADTF-Planer Ansicht V01	ADTF-Planer Ansicht V02	Beobachtetes Verhalten V01 & V02
10.2 s			- V01 plant somit bereits im darauffolgenden Planungs-Zyklus einen Spurwechsel auf die Autobahn bei Beibehaltung seiner Geschwindigkeit, da diese Interims-Trajektorie nun kollisionsfrei ist (I-AK). - Somit existiert auch keine kostengünstigere I-NK Interims-Trajektorie mehr, sodass V01 hier und im Folgenden keinen Wunsch mehr äußert. - V02 behält weiterhin als Plan-Trajektorie (weiß) den Spurwechsel auf den mittleren Fahrstreifen der Autobahn bei.
17 s			- Einige Sekunden später ist V01 bereits fast vollständig auf die Autobahn aufgefahren. - V02 ist parallel zum Einfädelprozess von V01 fast vollständig auf den mittleren Fahrstreifen der Autobahn gewechselt. - Wunsch-Trajektorien werden auch hier nicht mehr generiert.
20 s			Im weiteren Verlauf fahren V01 und V02 leicht versetzt nebeneinander auf der Autobahn.

Analog zum Vorgehen mit den anderen Parametersätzen wurde das Szenario dreifach wiederholt durchlaufen. Abbildung 63 stellt die abgefahrenen Trajektorien dieser Durchläufe für V01 und V02 als lokale Koordinaten relativ zur Straße dar. Im Gegensatz zu den Durchläufen mit den Parametersätzen 1 und 2 lässt sich dabei erkennen, dass V02 in jedem der Durchläufe einen Spurwechsel durchgeführt, um V01 das Einfädeln zu ermöglichen. Zudem sind in Abbildung 64 die Wunsch-Trajektorien von V01 dargestellt sowie alle kooperativen Antworten auf diese Wunsch-Trajektorien seitens V02. Dabei lässt sich erkennen, dass V01 in allen drei Durchgängen ab einem Zeitpunkt von etwa 10 s (Simulationszeit) zwei oder drei Wunsch-Trajektorien als MCM versendete, die V02 akzeptierte. V01 versandte hier mehr als eine Wunsch-Trajektorie, da die weiteren Wunsch-Trajektorien bereits generiert wurden, bevor V02 seine Plan-Trajektorie an die Akzeptanz des ersten Wunsches angepasst hatte. Im weiteren Verlauf der Simulationen wurden keine weiteren Wunsch-Trajektorien versendet. Somit entsprechen auch diese Ergebnisse den Erwartungen für den Parametersatz 3 aus Tabelle 2.

V01 & V02 Trajektorien als lokale Koordinaten relativ zur Straße

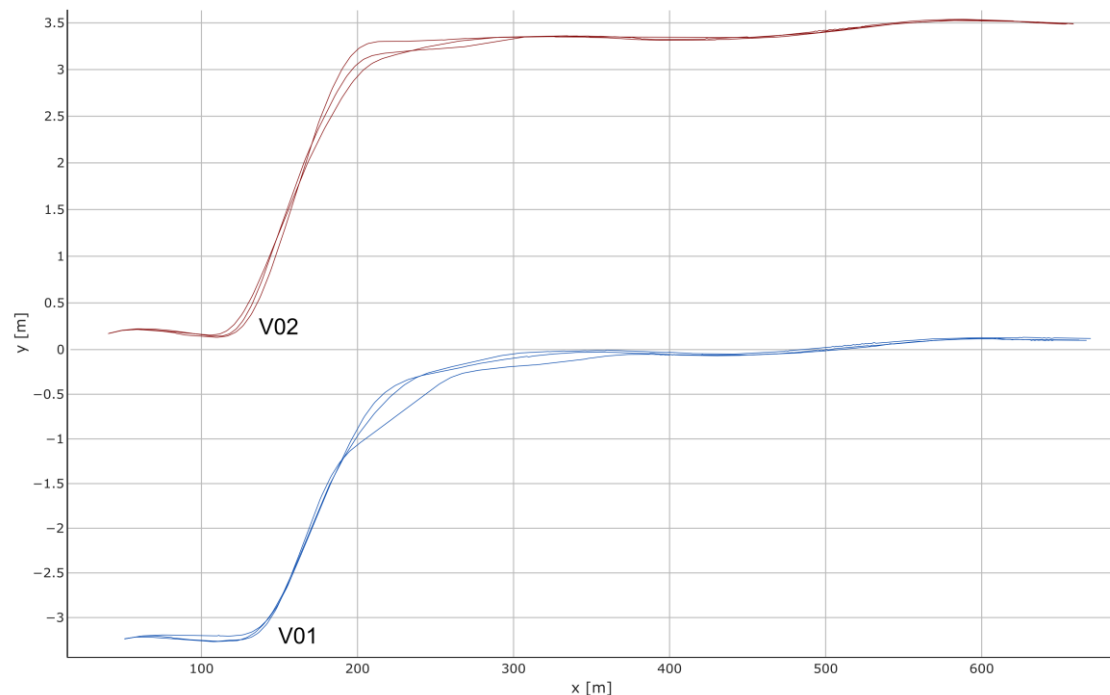


Abbildung 63: Lokale Koordinaten relativ zur Straße der Trajektorien von V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 3



Abbildung 64: Ergebnisse der kooperativen Manöverabstimmung zwischen V01 und V02 in drei Durchläufen mit dem Parametersatz 3

Abschließende Bewertung:

Zusammenfassend konnten für alle drei Parametersätze auch bei einer mehrfachen Wiederholung der Simulationsdurchläufe stets das erwartete Verhalten entsprechend den Definitionen aus Tabelle 2 aufgezeigt werden. Somit kann die Verifikation des kooperativen Manöverplaners als erfolgreich angesehen werden.

4.3.2 Verifikation Funktion F3 und Kooperatives Umfeldmodell

Die Funktion "Kooperatives Überholen auf Landstraßen" basiert auf dem Konzept der Kollektiven Perzeption. Der Grundgedanke dabei ist, dass das Wissen zu wahrgenommenen Verkehrsteilnehmern an andere Verkehrsteilnehmer per V2X-Kommunikation weitergegeben wird. Was der eine nicht selbst mit fahrzeugeigener Sensorik wahrnehmen kann, sei es aufgrund von Verdeckung oder zu geringer Sensorreichweite, kann aber vielleicht ein anderer sehen. Durch den gegenseitigen Austausch dieses Wissens entsteht in jedem teilnehmenden Fahrzeug eine Erweiterung des vorhandenen Wissens durch das Wissen anderer (Kollektive Perzeption). Idealerweise liegt so jedem der eingebundenen Verkehrsteilnehmer zu jedem Zeitpunkt das gleiche Wissen über die aktuelle Verkehrssituation vor. In der Realität wird dies aufgrund der hohen Dynamik des Verkehrsgeschehens vermutlich ein Ideal bleiben. Dennoch ist durch diesen Wissensaustausch eine signifikante Verbesserung des Umfeldwissens zu erwarten. Aus dem Umfeldmodell der fahrzeugeigenen Sensorik wird mit dieser Technologie ein "kooperatives Umfeldmodell".

4.3.2.1 Funktion F3 "Kooperatives Überholen auf Landstraßen"



Abbildung 65: Funktionsweise der Kollektiven Überholwarnung

Die IMAGinE-Funktion F3 nutzt den Austausch sogenannter Collective Perception Messages (CPM) über V2X, um das Umfeldwissen, repräsentiert durch das in IMAGinE entwickelte Kooperative Umfeldmodell, zu erweitern. Abbildung 65 zeigt das dieser Funktion zugrundeliegende Fahrscenario: Die Sicht eines Fahrzeugs ist durch einen vorausfahrenden Lkw eingeschränkt, so

dass ein entgegenkommendes Fahrzeug nicht mit der eigenen Fahrzeugsensorik wahrgenommen werden kann (Abbildung 65, links).

Der vorausfahrende Lkw indes kann das entgegenkommende Fahrzeug mittels seiner eigenen Sensorik wahrnehmen. Zudem ist er mit V2X ausgestattet und kann so den Fahrzeugen in der Umgebung die Information bezüglich des entgegenkommenden Fahrzeugs via CPM senden (Abbildung 65, Mitte). Das nachfolgende Fahrzeug empfängt die CPM und ergänzt mit dieser Information sein eigenes Kooperatives Umfeldmodell. Die IMAGinE-Funktion F3 interpretiert die Informationen aus dem Kooperativen Umfeldmodell und warnt entsprechend im Kooperativen HMI den Fahrer vor dem Gegenverkehr (Abbildung 65, rechts).

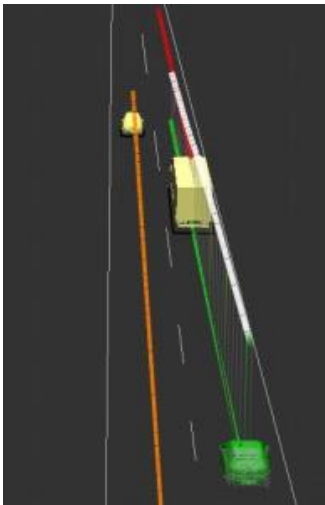


Abbildung 66: Realisierung der Funktion F3 zum kooperativen Überholen auf Landstraßen im Simulator

Abbildung 66 zeigt die Umsetzung der Funktion F3 im Simulator. In CarMaker ist das entsprechende Szenario, wie in Abbildung 56 beschrieben, realisiert. In der CarMaker-Testautomation werden die Parameter gesetzt, die für die F3 notwendig sind. Dazu zählen ein längerer Planungshorizont, da dieser den kompletten Überholvorgang umfassen muss. Auch müssen die Kosten für einen Wechsel auf die Gegenfahrbahn mit den Kosten für eine reduzierte Geschwindigkeit (für den Fall, dass Ego hinter dem Vorderfahrzeug bleibt) und den Kosten für den Mindestabstand (welche gegebenenfalls kurzzeitig während des Überholens unterschritten werden kann) ausbalanciert werden.

Die Parameter aus der CarMaker-Testautomatisierung der IMAGinE-Umgebung werden an den Kooperativen Manöverplaner übergeben. Die Aufgabe des Kooperativen Manöverplaners besteht darin, die Trajektorien für die automatisierte Fahrt einschließlich des Überholmanövers zu berechnen. Eine Kooperation im Sinne des Austausches von Wunsch- und Plantrajektorien findet in dieser Funktion nicht statt. Das Manöver wird auf Basis des IMAGinE-Umfeldmodells durchgeführt.

Die dieser Funktion zugrundeliegende IMAGinE-Kerntechnologie ist also das Kooperative Umfeldmodell (ergänzt um ein Kooperatives HMI, sofern ein Fahrer eingebunden werden muss).

Von dem Kooperativen Manöverplaner wird hier nur die Berechnung der Plantrajektorie genutzt; Wunschtrajektorien werden für dieses Szenario nicht benötigt und folglich auch keine Maneuver Coordination Messages (MCM) gesendet. Da die reine Warnfunktion nicht Kerntechnologie von IMAGinE ist, diese aber zwingend das Kooperative Umfeldmodell voraussetzt, erfolgt die Validierung der IMAGinE-Funktion F3 durch die Validierung des Kooperativen Umfeldmodells.

4.3.2.2 Kooperatives Umfeldmodell (IMAGinE-GUA2)

Das Umfeldmodell, wie es im Rahmen von IMAGinE umgesetzt wurde, ist aus Ressourcengründen (Zeit und Geld) auf die Basisfunktionalität beschränkt:

- Für die Prädiktion der Tracks (also der Objektliste) wird das Constant-Turn/Constant-Velocity-Modell (auch "Linearized Constant Turn Rate and Acceleration" oder CTRA-Modell genannt) verwendet.
- Die Prädiktion für die nächsten Messwerte erfolgt mit einem Erweiterten Kalman-Filter (EKF). Dieser setzt voraus, dass Eingangswerte zumindest partiell linear sind.
- Prädiktion und Gating setzen voraus, dass alle Werte des Kalman-States vollständig sind (einschließlich Lenkwinkel und Lenkwinkelrate).
- Das im Rahmen des Umfeldmodells mitentwickelte Map-Matching ist sehr rudimentär gehalten. Die Zuordnung eines Tracks zu einem Fahrsteifen erfolgt rein auf Basis der jeweiligen Position.
- Die Eingangsdaten, die das partnerspezifische Umfeldmodell bereitstellt, sind Elemente einer Objektliste, welche durch partnerindividuelle Fusionierung der fahrzeugeigenen Sensordaten erzeugt wird. Diese Objekte wiederum werden mit den Objekten aus den empfangenen V2X-Nachrichten fusioniert.
- Das Umfeldmodell setzt "bereinigte" Eingangsdaten voraus. Es führt keine Vorverarbeitung der Eingangsdaten durch.

Die Visualisierung des Umfeldmodells zeigt vor allem in der realen Welt Artefakte, die Hinweise auf die Möglichkeiten und Grenzen des Kooperativen Umfeldmodells geben. Aufgrund der Vielzahl von zum Teil nicht-deterministischen und überlagerten Effekten ist eine detaillierte Analyse jedoch schwierig. In der idealen Welt der Simulation hingegen müssen künstliche Verschlechterungen eingebaut werden, um Effekte der realen Welt untersuchen zu können. Dies wurde, für den Volkswagen-Simulator, innerhalb der CarMaker-Umgebung durch den IMAGinE-Partner IPG und außerhalb dessen durch Volkswagen im Rahmen von IMAGinE umgesetzt.

4.3.2.2.1 Beobachtete Artefakte im Realfahrzeug

In der Realität dominant auftretende Effekte waren vor allem driftende Objekte und zusätzliche Objekte in der Visualisierung gegenüber der Realität. Letzteres liegt daran, dass das Kooperative Umfeldmodell zu viele Tracks angelegt hat, was wiederum darauf zurückgeführt wurde, dass die

eingehenden Daten nicht "bereinigt" waren. Dazu gehören insbesondere Daten mit großer Abweichung zu den bisher gemessenen Daten ("unsaubere" oder stark gestreute Messdaten) und False-Positives (z. B. durch Reflektionen von Radar- oder Lidar-Signalen, welche als Objekte aus dem partnerspezifischen Umfeldmodell an das Kooperative Umfeldmodell weitergegeben wurden). Das Driften von Objekten wurde vor allem auf eine falsche Prädiktion zurückgeführt, für welche wiederum das Ausbleiben von Informationen (z.B. aufgrund temporär nicht empfangener V2X-Nachrichten) oder nichtlineare Eingangssignale als Ursache gesehen wurden. Das zeitweilig ebenfalls in realen Testfahrten beobachtete Rotieren von Objekten wurde auf fehlende oder unvollständige Informationen aus den V2X-Nachrichten zur Orientierung resp. Orientierungsänderung zurückgeführt.

Um die in Realität beobachteten Effekte nachzubilden, wurden verschiedene Szenarien in CarMaker erstellt. Die Testautomatisierung des CarMakers, welche für IMAGinE eigens vom Partner IPG entwickelt wurde, musste von Volkswagen auf die partnerspezifischen Gegebenheiten angepasst werden, damit die dort gesetzten Parameter auch zu den Volkswagen-Modulen im ADTF-Framework weitergereicht und umgesetzt werden.

4.3.2.2.2 Nachbildung der Artefakte und deren Untersuchung im Simulator

Um die Möglichkeiten und Grenzen des Kooperativen Umfeldmodells auf reproduzierbare Ursachen zurückführen zu können, galt es nun, die in der realen Welt wahrgenommenen Artefakte in der Simulation nachzubilden. Dazu mussten vor allem die Eingangssignale künstlich verschlechtert werden. Abbildung 67 zeigt ein dazu verwendetes Szenario.

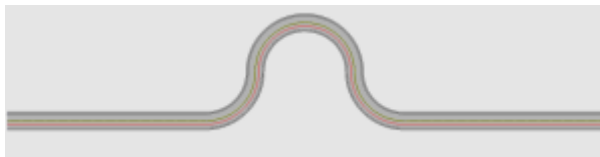


Abbildung 67: Szenario für die Untersuchung der Prädiktion in Kurvenfahrten

In der reinen Untersuchung des Kooperativen Umfeldmodells wurde die Kartendarstellung nicht verwendet. Abbildung 68 zeigt das Ego-Fahrzeug bei der Durchfahrt des in Abbildung 67 dargestellten Straßenverlaufs. Vor ihm fährt in konstantem, longitudinalen Abstand ein weiteres IMAGinE-Fahrzeug. In diesem Basisszenario werden noch keine künstlichen Verschlechterungen verwendet. Das Simulationsergebnis ist daher ideal. Der longitudinale Versatz der CPM-Objekte (orange) ist auf die mit geringerer Frequenz (gegenüber der Fahrzeugsensorik) aktualisierten V2X-Positionsdaten zurückzuführen und daher korrekt.

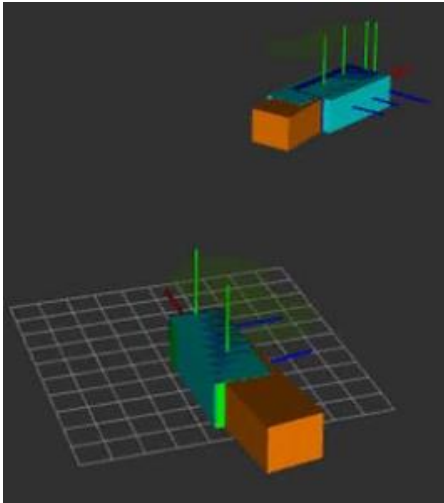


Abbildung 68: Basisszenario ohne eingebrachte Störeffekte; Ego durchfährt hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug die Kurven. Das Ego-Fahrzeug ist dabei grün dargestellt, blau sind die von der fahrzeugeigenen Sensorik detektierten Objektpositionen, "orange" die CPMs und "gelb" (in diesem Snapshot gerade nicht zu sehen) die CAMs. In türkis sind die Ergebnisse der Objektfusionen dargestellt.

4.3.2.2.1 Konstanter Offset

Für CarMaker wurde im Rahmen des Projektes die Möglichkeit geschaffen, aus den idealen Sensordaten Daten mit konstantem Offset zu generieren. Dies sollte erwartungsgemäß dazu führen, dass zum einen Objekte, die mit der fahrzeugeigenen Sensorik wahrgenommen wurden, einen konstanten Offset haben. Zum anderen wird dieser Offset für die wahrgenommenen Objekte auch mit der CPM gesendet. Die ermittelte Ego-Position bleibt aber korrekt, sowohl in der eigenen Wahrnehmung als auch für das Senden per CPM. Dies konnte in der Simulation nachgestellt werden (siehe Abbildung 69).

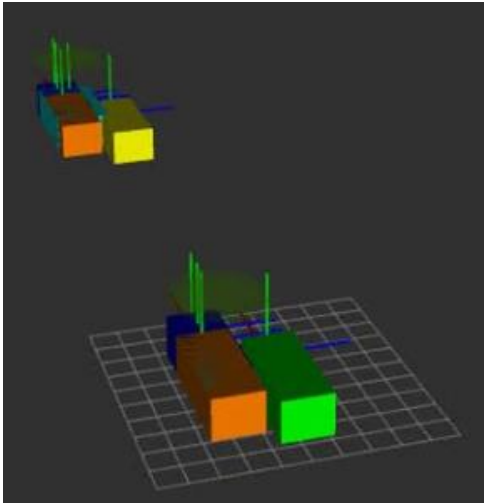


Abbildung 69: Ein konstanter Offset in der fahrzeugeigenen Sensorik führt zum Versatz (blau) gegenüber der vom Fahrzeug selbst übermittelten Position (gelb) sowie der vom Kommunikationspartner wahrgenommenen und kommunizierten Position (orange) des Ego-Fahrzeugs (grün). Das Ergebnis der Sensordatenfusion zeigt dadurch ebenfalls einen Versatz (türkis).

Die Eingangsdaten des Kooperativen Umfeldmodells sind also bezüglich der Ego-Position korrekt, sofern es die Information der eigenen Sensorik betrifft. Via CPM hingegen erhält das Kooperative Umfeldmodell für die eigene Position einen konstanten Offset. Umgekehrt sollten die anderen Fahrzeuge aufgrund der eigenen Wahrnehmung einen Offset haben, jedoch via CPM die jeweils korrekte Position übermittelt bekommen (siehe Abbildung 69).

Folglich sollte die Filterung des Ego-Fahrzeugs aus den CPM-Daten ab einem bestimmten Offset keinen Erfolg mehr haben und stattdessen ein zweiter Track mit konstantem Offset neben dem Ego-Fahrzeug aufgemacht werden. Auch dies konnte beobachtet werden (siehe Abbildung 70).

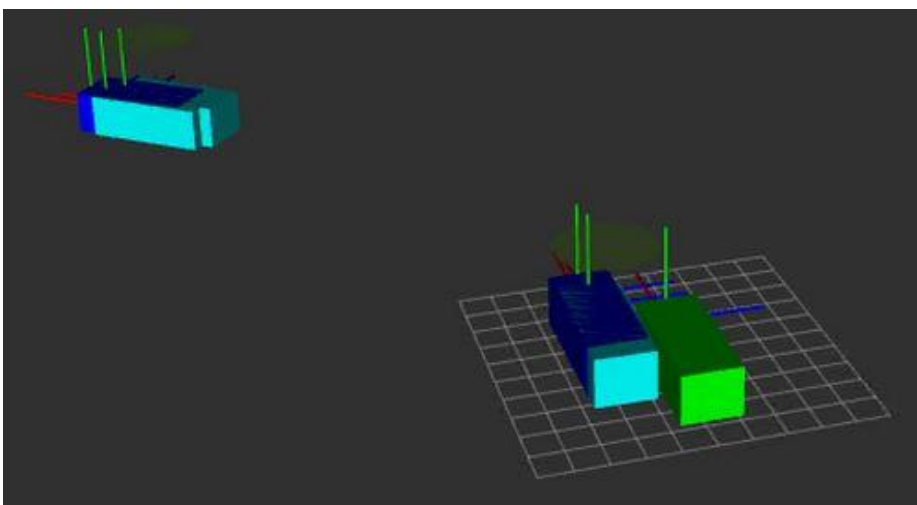


Abbildung 70: Fälschlich erzeugtes Objekt (türkis, unten links) aufgrund empfangener CPM, welche eine Objektposition enthält, die sich nicht mit der Ego-Position vereinbaren lässt.

4.3.2.2.2 Konstanter Offset mit überlagertem "Rauschen" der Position

Die CarMaker-Umgebung ermöglicht es zudem, die übermittelte Ego-Position zu "verrauschen". In der Simulation ließ sich nachstellen, dass je nach Stärke des gewählten Offsets und des überlagerten Positionsrauschens sowie der Größe des gewählten Gates für den Datenfusionsprozess des Kooperativen Umfeldmodells ein zusätzlicher (und damit falscher) Track aufgemacht wurde (s. Abbildung 71) oder nicht. Das Kooperative Umfeldmodell verhält sich daher auch hier korrekt.

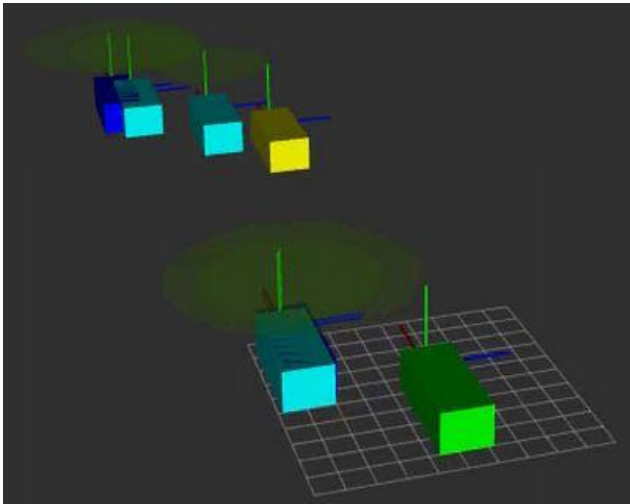


Abbildung 71: Zusätzlich aufgemachte Tracks durch zu große Positionsfehler für die gewählte Gate-Größe

4.3.2.2.3 Fehlende Information zu Orientierung und Orientierungsänderung

Fehlende Informationen zu "yaw rate" und "curvature" sollten sich derart auf die Prädiktion auswirken, dass verwendete Constant-Turn/Constant-Velocity-Model zu falschen Vorhersagen der zu erwartenden Messwerte führt. Wenn die Varianzen so gewählt sind, dass der Prädiktion mehr vertraut wird als den Messwerten, sollte in Kurvenfahrten ein Abdriften des Objekts zu beobachten sein (s. Abbildung 72).

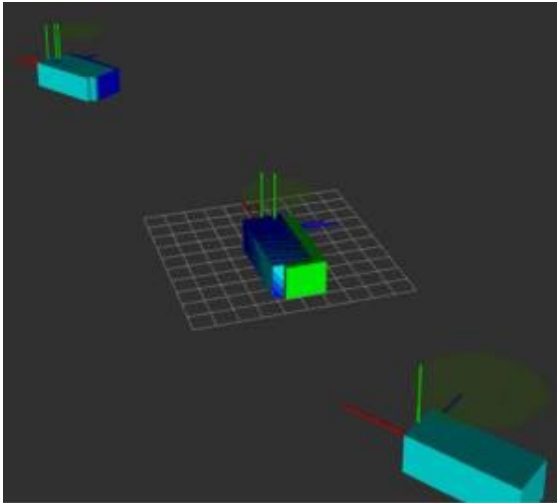


Abbildung 72: Driften eines Objektes, hier aufgrund eines nicht mehr aktualisierten Tracks

Ebenso sollten Kurvenfahrten, die nicht mit konstantem Lenkwinkелеinschlag durchfahren werden können, bei entsprechend gewählten Varianzen ein Driften der Objekte verursachen. Deutlicher sollte dieser Effekt sein bei Kurven, die nicht mit konstanter Lenkwinkeländerung durchfahrbar sind, immer vorausgesetzt, dass der Prädiktion mehr getraut wird als den Messwerten.

Die Szenarien wurden für die Untersuchung zur Auswirkung eines konstanten Offsets durchfahren, wobei als Parameter der Offset variiert wurde. Die Auswertung ergab, dass das Umfeldmodell die erwarteten Effekte wie oben genannt nur sporadisch zeigte. In der Regel war kein Effekt zu bemerken. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Aktualisierungsrate der Positionsinformationen hoch genug ist, um die fehlenden Informationen weitestgehend zu kompensieren.

Für die Untersuchung des Einflusses nicht-linearer Fahrweise auf die Prädiktionsqualität des Kooperativen Umfeldmodells wurden Szenarien mit hohem Kurvenanteil erstellt. Diese Nicht-Linearität stellt den ersten Parameter der Untersuchung dar. Der zweite, variierte Parameter ist die Geschwindigkeit. Je nachdem, wie gut das Kooperative Umfeldmodell mit dem Einfluss dieser Parameter umgehen kann, sollte ein mehr oder weniger starkes Driften aus den Kurven zu sehen sein.

Um die Auswirkungen der fehlenden Information zu "yaw rate" und "curvature" zu untersuchen, wurden wieder die angegebenen Szenarien durchfahren. Die variierten Parameter waren die Fahrzeuggeschwindigkeiten wie die Variation der Kurvenkrümmung, wie sich durch die Szenarien vorgegeben sind. Die Parametrisierung des Kalman-Gains entsprach den Standard-IMAGinE-Werten. Es zeigten sich vereinzelt Drift-Artefakte. Abgesehen davon konnte die Datenfusion die beiden Fahrzeuge relativ stabil mit konstantem Offset positionieren (s. Abbildung 73).

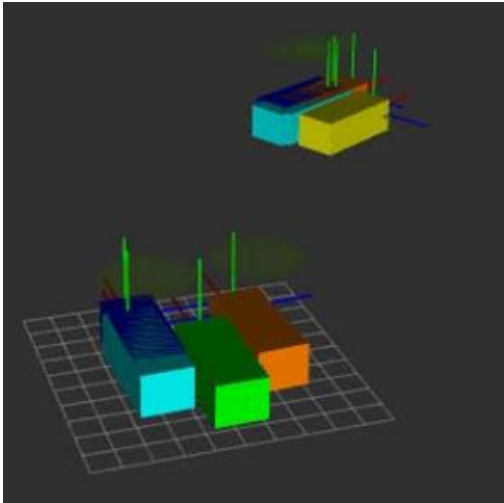


Abbildung 73: Kurvenfahrt mit konstantem Offset und ohne Gierrate-Information; Die Visualisierung zeigt, dass der Offset als Artefakt zu einem zusätzlichen Track des Ego-Fahrzeugs führt.

4.3.2.2.2.4 Einfluss des Kalman-Gains resp. der Varianzen

Sämtliche oben genannten Parameter hatten zwar Einfluss auf die Datenfusion des Kooperativen Umfeldmodells, führten jedoch nicht dazu, dass das Fusionsergebnis unplausibel wurde oder grobe Fehler zeigte. Die Sensoreingangsdaten in der Simulation sind trotz künstlicher Verschlechterung immer noch deutlich idealer sind als die Daten aus realen Fahrzeugsensoren. Zwar war eine Stetigkeit der Objektrepräsentationen mit zunehmendem Störeinfluss auch immer weniger gegeben. Jedoch sollte eine Glättung der Fusionsergebnisse in einer nachgelagerten Instanz keine signifikanten Nachteile für die Funktionsentwicklung ergeben. Diese Aussage gilt allerdings nur für eine ausgeglichene Wahl der Varianzen von Messwerten und prädictierten Werten.

Daher galt es nun, den Einfluss des Kalman-Gains genauer zu untersuchen. Dazu soll das Kalman-Gain so variiert werden, dass zunehmend der Prädiktion vertraut und den Sensordaten misstraut wird. Ein Kalman-Gain ist nicht explizit als Solches im Kooperativen Umfeldmodell benannt. Die Wirkungsweise des Kalman-Gains wird stattdessen durch die Parametrisierung der Varianzen in der Konfigurationsdatei eingestellt. Je größer die Varianz zu einem Wert gewählt wird, desto weniger wird dieser Wert für die Datenfusion berücksichtigt. Es ist zu erwarten, dass mit zunehmenden Vertrauen in die prädictierten Daten die Fusion stärker ausgeprägte Artefakte wie Driften oder Kreiseln zeigt.

Dazu müssen in der Konfigurationsdatei des Kooperativen Umfeldmodells die Varianzen variiert werden, um die oben beschriebenen Effekte besser provozieren zu können. Konkret handelt es sich um die Parameter `cov_modification_default_variance_rel_*` für die fahrzeugeigene Sensorik, `cov_modification_default_variance_abs_*` für die V2X-Nachrichten (jeweils mit "cov_modification_mode : 3" für "immer überschreiben") sowie `ekf_process_variance_*` für die Prädiktion. Je größer die Varianz gewählt wird, desto größer die Unschärfe und desto weniger die Berücksichtigung für die Datenfusion.

Da bei hohen Varianzen bei Fahrzeugsensorik und V2X-Nachrichten dem Prädiktionsergebnis mehr getraut wird, wäre zu erwarten gewesen, dass die Prädiktion aufgrund der einfachen Modelle (EKF und CTRA) zu schlechteren Fusionsergebnissen führt. In der nachfolgenden Abbildung ist die Auswirkung des Offsets deutlicher zu sehen als bei der Abbildung zuvor. Verstärkend kommt hinzu, dass zusätzlich zum konstanten Offset auch noch ein weiterer, verteilter Offset hinzukommt. Letztendlich lässt sich aber kein eindeutig auf die hohen Varianzen zurückzuführender Effekt erkennen.

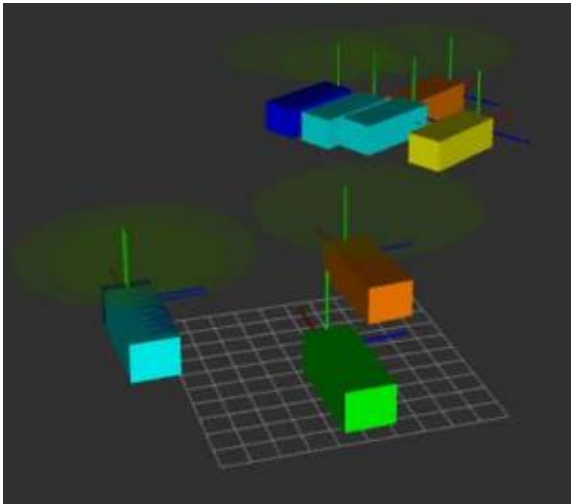


Abbildung 74: Kurvenfahrt mit hohem konstanten Offset und hoher Streuung der Position und hoher Varianz auf der fahrzeugeigenen Sensorik

4.3.2.2.5 Skalierbarkeit des Konzepts

Ein weiterer zu untersuchender Aspekt ist die Skalierbarkeit des Umfeldmodells. Denn in Anbetracht der oben beschriebenen Effekte ergeben sich Einschränkungen bezüglich der Fahrzeugdichte abzubildender Fahrzeuge. Je größer die Störeffekte sind, desto geringer muss die Fahrzeugdichte rund um das Ego-Fahrzeug sein, damit eine Assoziierung der wahrgenommenen Signale zu den im Umfeldmodell verwalteten Tracks noch sinnvoll möglich ist. Für diese Untersuchung wurde ein Kreuzungsszenario gewählt (s. Abbildung 75).

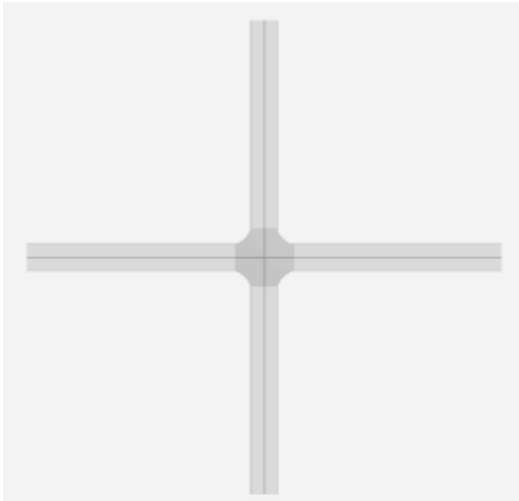


Abbildung 75: Szenario für die Untersuchung der Skalierbarkeit

Abbildung 76 zeigt das Basisszenario der Kreuzungsdurchfahrt ohne künstlich eingebrachte Störungen. Es ist zu erkennen, dass eine Assoziierung der Positionsinformationen eindeutig einander zuordbar sind.

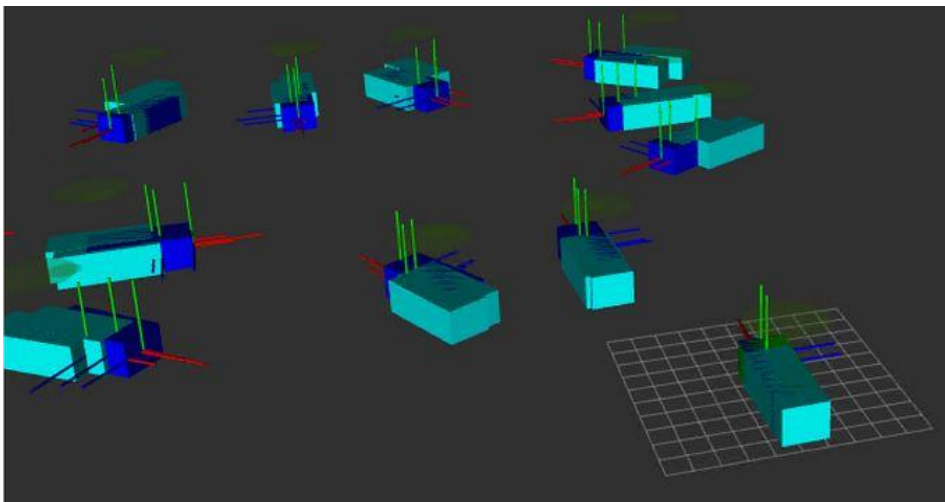


Abbildung 76: Basisszenario zur Skalierbarkeit

Abbildung 77 zeigt indes, wie schwierig es sein kann, bei großer Assoziierungsunsicherheit der eingehenden Signale zuverlässige Rückschlüsse auf die genaue Anzahl und Position der tatsächlich vorhandenen Fahrzeuge schließen zu können. Aufgrund der unrealistisch geringen Aktualisierungsrate von 1.000 ms für V2X-Nachrichten in der Simulation wird die Assoziierung unnötig erschwert, daher ist Abbildung 77 eigentlich nicht zielführend.

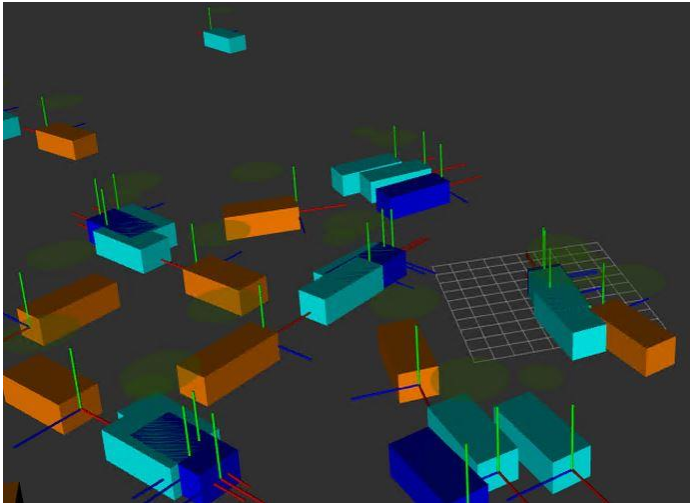


Abbildung 77: Abbiegen in einer Kreuzung bei hoher Fahrzeugdichte und konstant versetztem Fahrzeugsignalen. Die Zuordnung zu den tatsächlich vorhandenen Fahrzeugen ist immer noch möglich, weil die orangen Blöcke aufgrund der in der Simulation verwendeten geringen Aktualisierungsrate von 1.000 ms nicht realitätsgemäß verschlechtern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Kooperative Umfeldmodell recht stabil die Datenfusion bewältigt. Ein konstanter Offset hat auch eine konstante Auswirkung auf das Fusionsergebnis. Realistischer ist sicherlich das verrauschte Signal, dessen Auswirkungen in Abbildung 74 zu erkennen ist und das auch den signifikantesten Einfluss auf die Trackzuordnung hat. Die Prädiktion indes ist vermutlich deswegen nicht so schlecht, weil die Aktualisierungsrate der Messwerte noch ausreichend ist, so dass EKF und CTFA offensichtlich damit klarkommen. Folglich wirken sich auch höhere Varianzen bei den Messwerten offensichtlich nicht so stark aus.

4.4 Konzeptverifikation OPEL

In diesem Kapitel wird ein simulationsbasiertes Proof-of-Concept des im Rahmen von IMAGinE prototypisch umgesetzten Konzepts *Opel Core* (s. [Konzeptvorstellung OPEL \(D2.5\)](#)) hinsichtlich seiner grundsätzlichen Wirkung auf die Verkehrsqualität anhand der Funktion F1 vorgestellt. Die dafür eingesetzte Simulationsumgebung, bestehend aus einer statischen und dynamischen Kopplung von Fahrdynamiksimulation *CarMaker* und Verkehrsflusssimulation *SUMO*, ist in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen [1] und [2] ausführlich beschrieben.

4.4.1 Metriken und Szenarien

Zwecks Proof-of-Concept von *Opel Core*, um den Einfluss der kooperativen Manöverplanung und -abstimmung mit dem Konzept auf verschiedene Aspekte der Verkehrsqualität quantitativ zu bewerten, werden zunächst geeignete Evaluationsmetriken und Simulationsszenarien benötigt. Eine Übersicht der hier angewandten Metriken ist in der nachfolgenden Abbildung illustriert. Dabei werden diese Metriken nur auf die Fahrzeuge angewandt, die sich temporär in einem stationären Bereich, sog. Region of Interest (RoI) befinden. Diese RoI beinhaltet ein Segment der

Straße, wo ein häufiges Geschehen von kooperativen Manövern erwartet wird (z. B. an der Autobahnauffahrt). Somit werden im Weiteren folgende Metriken verwendet, zu deren mathematischen Definitionen auf [1] verwiesen wird:

1. Verkehrsfluss
 - a. Verkehrsdichte k
 - b. Verkehrsgeschwindigkeit v
 - c. Verkehrsstärke q
2. Variationkoeffizient CV
3. Time-Exposed Time-to-Collision $TETTC$
4. Raumzeitliche Muster

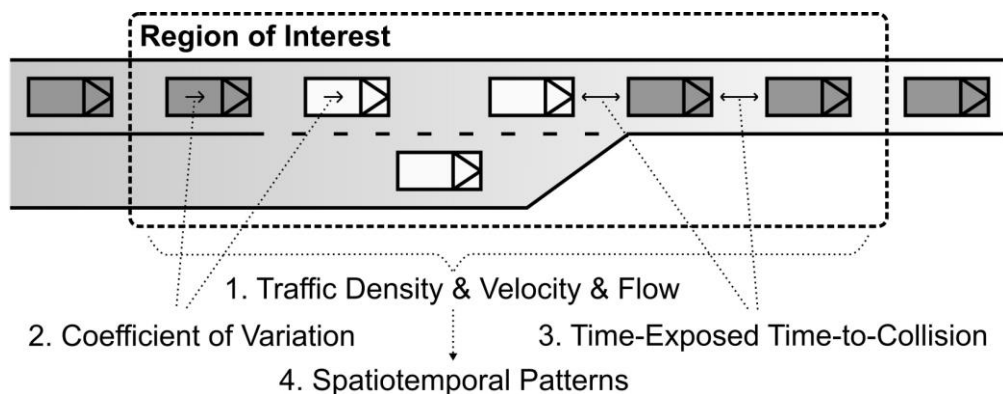


Abbildung 78: Übersicht der Metriken der Verkehrsqualität, angewandt auf eine generische Autobahnauffahrt (Funktion F1) [1]

In diesem Proof-of-Concept wird der Fokus auf drei verkehrliche Szenarien gelegt. Diese Szenarien werden synthetisch mit der Simulationsumgebung generiert und in Abhängigkeit des Verkehrszustandes, den sie nachbilden, wie folgt bezeichnet:

1. 'Congested'
2. 'with CMC' (Cooperative Maneuver Coordination)
3. 'Free'

Bei 'Congested'- und 'Free'-Szenarien ist der Algorithmus der kooperativen Manöverplanung und -abstimmung deaktiviert, um somit Grenzfälle für die Evaluation zu erzeugen. Auf einer Seite, im Falle des 'Congested'-Szenarios, fahren die einfädelnden Fahrzeuge immer bis zum Ende des Beschleunigungsstreifens, bevor sie mit einem nicht-kooperativen Einfädeln beginnen, wobei dabei jedes Mal eine signifikante Schockwelle erzeugt wird (schlimmstmögliches Szenario). Auf anderer Seite, im Falle des 'Free'-Szenarios, gibt es überhaupt keine einfädelnden Fahrzeuge, sodass der Verkehr auf der Autobahn kontinuierlich ungestört fließen kann (bestmögliches Szenario). Im Falle des 'with CMC'-Szenarios ist der Algorithmus aktiviert, was in mehreren

kooperativen Einfädelmanövern resultiert. Somit sollte bei einer erfolgreichen Kooperation das Ergebnis des 'with CMC'-Szenarios erwartungsgemäß zwischen den Ergebnissen der 'Congested'- und 'Free'-Szenarien liegen.

Eine gemeinsame Konfiguration von allen drei verkehrlichen Simulationsszenarien ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Hierbei wird, um möglichst ersichtliche und klar interpretierbare Ergebnisse mit den ausgewählten Metriken zu erzielen, das Verkehrsverhalten in der Simulation hinsichtlich Folgefahrt und Geschwindigkeitseinhaltung auf ideal gesetzt. Darüber hinaus wird eine perfekte V2X-Kommunikation angenommen, d. h. unbegrenzte Reichweite ohne Latenzen und Verluste.

Tabelle 6: Konfiguration der Simulationsszenarien [1]

Parameter	Wert
Dauer eines verkehrlichen Szenarios	90 s
Anzahl der kooperativen Manöver pro verkehrliches Szenario	3
Anzahl der Fahrstreifen auf der Autobahn	1
Geschwindigkeitsbeschränkung auf der Autobahn	100 km/h
Verkehrsnachfrage	7200 Fzg/h
Länge des Beschleunigungsstreifens	250 m
Gesamtlänge der Rol	500 m

4.4.2 Ergebnisse

4.4.2.1 Verkehrsfluss

Die Evaluationsergebnisse zum Verkehrsfluss im Zeitbereich sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt. Dort sind die Verkehrsdichte k , die Verkehrsgeschwindigkeit v (inkl. einer Standardabweichung) und die Verkehrsstärke q über der Simulationszeit t für alle Szenarien 'Congested', 'with CMC' und 'Free' abgebildet. Wie man hier im Falle des 'Congested'-Szenarios sieht, verursachen drei nicht-kooperative Einfädelmanöver auffällige Verringerungen der Verkehrsgeschwindigkeit, gefolgt von Erhöhungen der Verkehrsdichte, die insgesamt in Schwingungen der Verkehrsstärke resultieren. Im Gegensatz dazu bleiben im Falle des 'Free'-Szenarios die Verkehrsdichte, -geschwindigkeit und -stärke immer konstant. An dieser Stelle wird beim 'with CMC'-Szenario der positive Einfluss der kooperativen Manöverplanung und -abstimmung auf den Verkehrsfluss ersichtlich, da die Kooperation gleichmäßigere Einfädelvorgänge ermöglicht, die ihrerseits eine annähernd konstante (d. h. optimale) Verkehrsdichte, -geschwindigkeit und -stärke ergeben.

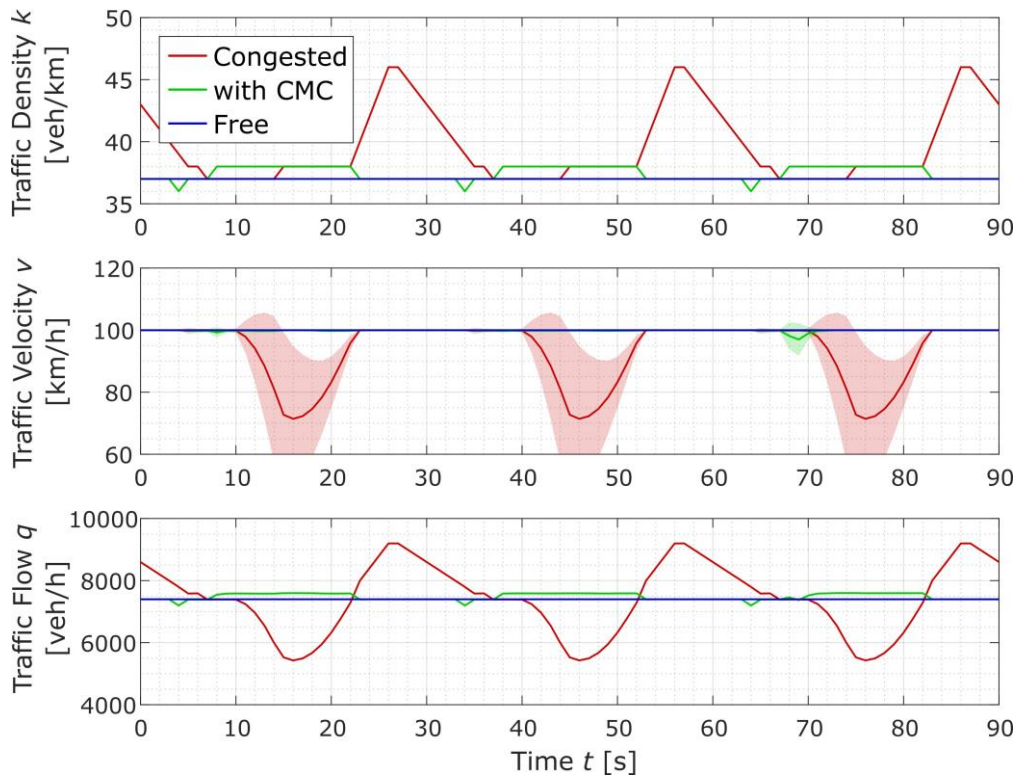


Abbildung 79: Ergebnis – Verkehrsdichte, -geschwindigkeit und -stärke im Zeitbereich [1]

Identische Simulationsergebnisse können auch in einem sog. Fundamentaldiagramm visualisiert werden, wie in der nachfolgenden Abbildung gezeigt. Hierbei repräsentieren Punkte im Diagramm unmittelbare Beziehungen zwischen Verkehrsdichte k , Verkehrsgeschwindigkeit v und Verkehrsstärke q . Grundsätzlich gilt hier, je näher die Punkte zum Grenzfall 'Free' (gelbe Zone) liegen, desto besser ist die Verkehrsqualität. Man kann sehen, dass die Punkte des 'with CMC'-Szenarios sich in der Nähe des 'Free'-Szenarios befinden, wohingegen die Punkte des 'Congested'-Szenarios stärker zerstreut aufgrund der hohen Schwankungen in Verkehrsdichte, -geschwindigkeit und -stärke sind.

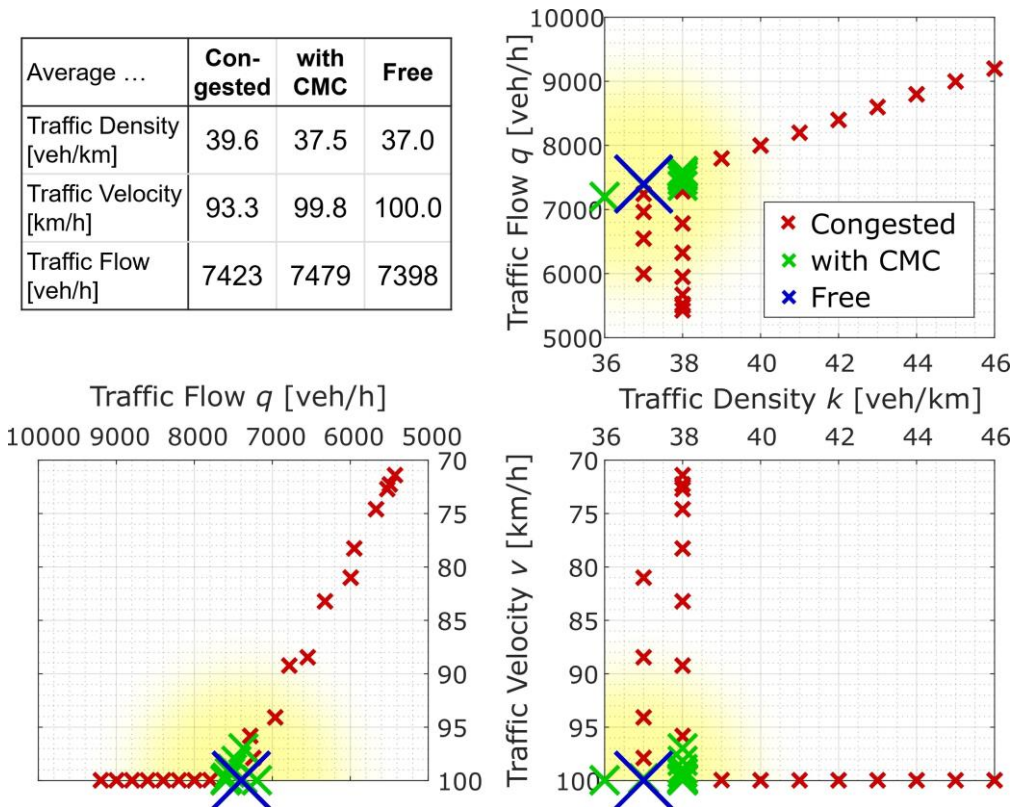


Abbildung 80: Ergebnis – Verkehrsdichte, -geschwindigkeit und -stärke als Fundamentaldia-
gramm [1]

4.4.2.2 Variationskoeffizient

Im nächsten Schritt wird der Variationskoeffizient CV der Fahrzeuggeschwindigkeiten ausgewertet. Dabei wird die Durchschnittsgeschwindigkeit sowie die dazugehörige Standardabweichung für jedes Fahrzeug, das sich in RoI während der Simulation eines verkehrlichen Szenarios aufhält, ermittelt. Dann wird daraus der Variationskoeffizient errechnet und in Form eines Streudiagramms dargestellt, wobei jeder Punkt hier ein Fahrzeug repräsentiert.

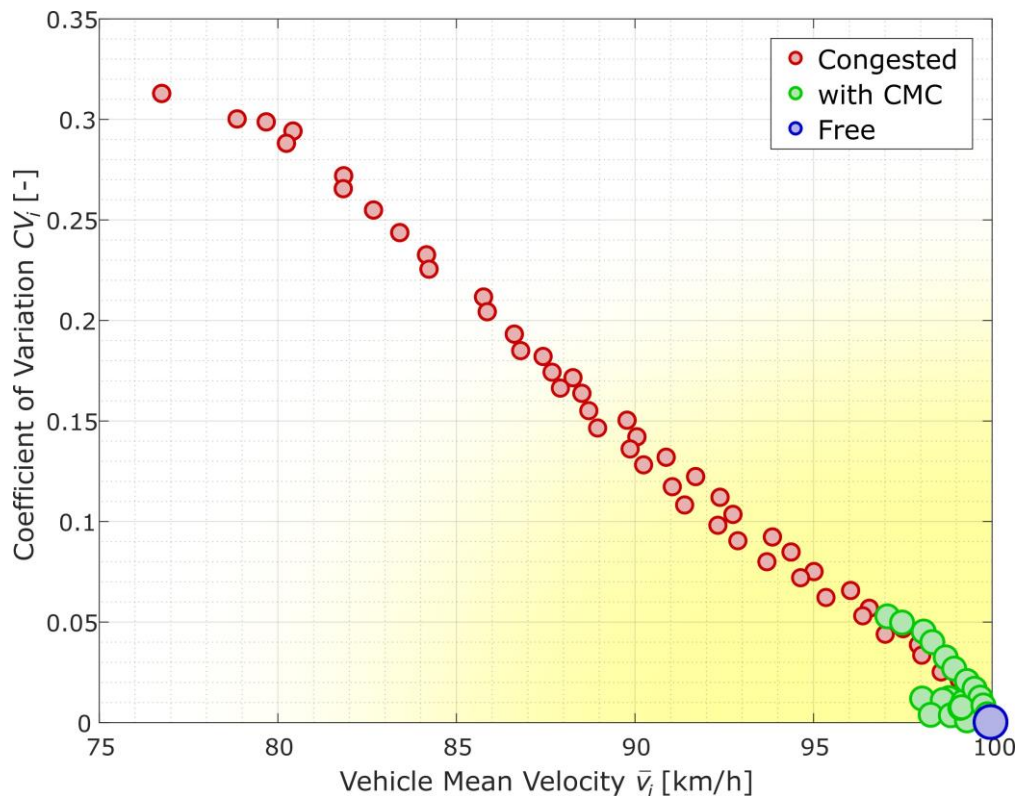


Abbildung 81: Ergebnis – CV über Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge [1]

Im Falle des 'Free'-Szenarios liegen alle dazugehörigen Punkte an einer Stelle, was bedeutet, dass alle Fahrzeuge in der Simulation ideal mit 100 km/h ohne Abweichungen gefahren sind. Im Falle des 'Congested'-Szenarios sind die Punkte stark zerstreut, was auf niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeiten und höhere Geschwindigkeitsänderungen für viele Fahrzeuge hindeutet. Im Vergleich dazu demonstriert das 'with CMC'-Szenario dazwischenliegende Werte, da der Algorithmus der kooperativen Manöverplanung und -abstimmung den CV-Wert durch gleichmäßigere Einfädelvorgänge an der Autobahnauffahrt sichtlich verbessert. Im Allgemeinen gilt, dass für eine bessere Verkehrsqualität höhere Geschwindigkeiten mit möglichst kleinen Änderungen bevorzugt werden, was durch gelbe Zone im Diagramm hervorgehoben ist. Dies resultiert in kürzeren Reisezeiten und einer besseren Energieeffizienz des Verkehrs.

4.4.2.3 Time-Exposed Time-to-Collision

Als nächste Metrik in der Evaluation der Verkehrsqualität wird *TETTC* ausgewertet, deren Ergebnisse im nachfolgenden Balkendiagramm gezeigt sind. Dafür wurde ein relativ hoher Schwellenwert von 25 s angesetzt, was auf das ideal angenommene Fahrverhalten (Folgefahrtmodell) in der Verkehrssimulation zurückzuführen ist. Dabei wird die Anzahl der Fahrzeuge mit gleichen (gerundet) *TETTC*-Werten durchgezählt, wobei *TETTC*=0 dabei ignoriert wird, und dann als Balken dargestellt.

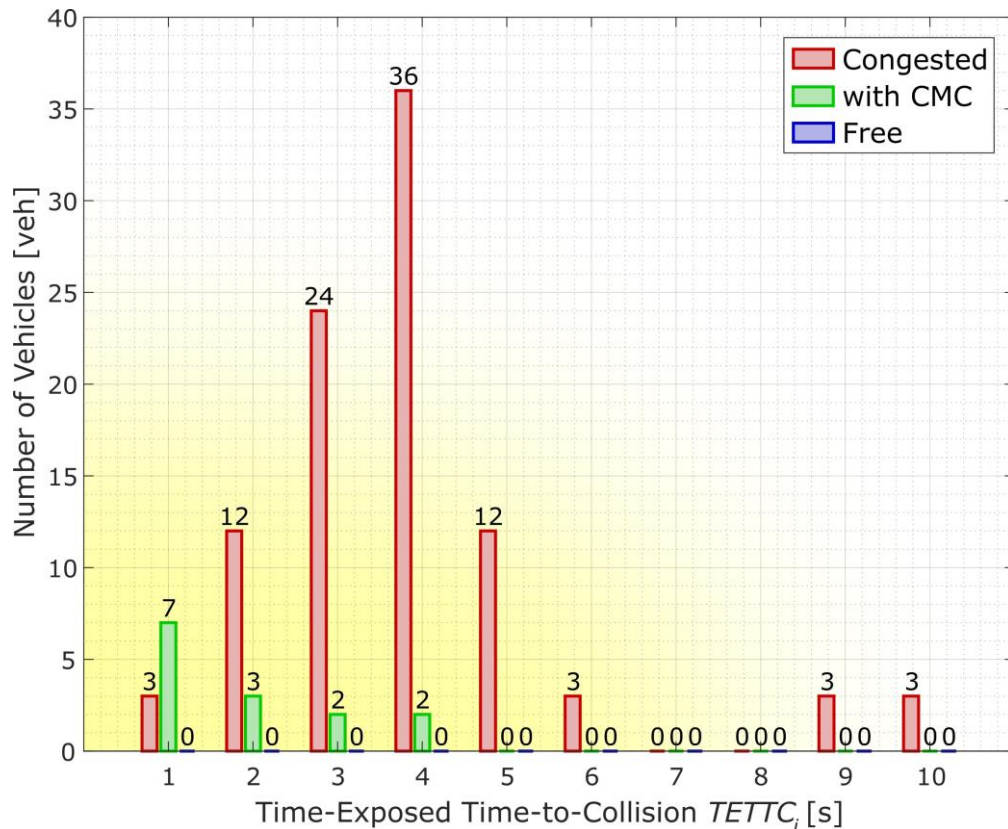


Abbildung 82: Ergebnis – Anzahl der Fahrzeuge mit entsprechenden TETTC [1]

Aus dem resultierenden Diagramm kann man erkennen, dass im Falle des 'Congested'-Szenarios viele Fahrzeuge hohe $TETTC$ aufgrund der reduzierten Abstände zu den vorausfahrenden Fahrzeugen über längere Zeitperioden (mehrere Sekunden) aufweisen, da sie dazu durch die nicht-kooperativen Einfädelmanöver gedrängt wurden. Im Gegensatz dazu haben im Falle des 'Free'-Szenarios alle Fahrzeuge $TETTC=0$. Anschließend liefert die Auswertung des 'with CMC'-Szenarios dazwischenliegende Werte, was durch konsistentere, longitudinale Abstände zwischen den Fahrzeugen während der Einfädelvorgänge mit kooperativer Manöverplanung und -abstimmung begründet wird. Im Allgemeinen gilt, dass weniger Fahrzeuge mit weniger $TETTC$ eine bessere Verkehrsqualität sowie höhere Verkehrssicherheit charakterisieren, was als gelbe Zone im obigen Diagramm repräsentiert ist.

4.4.2.4 Raumzeitliche Muster

Als letzter Schritt im Proof-of-Concept von *Opel Core* werden die raumzeitlichen Muster verwendet, die in den nachfolgenden Diagrammen für jedes Szenario 'Congested', 'with CMC' und 'Free' separat gezeigt sind. Hierbei werden die Positionen p der einzelnen Fahrzeuge in RoI als aufgezeichnete Trajektorien über der Simulationszeit t sowie die dazugehörigen Geschwindigkeiten v mit verschiedenen Farben dargestellt. In allen Diagrammen entspricht der Beginn des Beschleunigungsstreifens 0 km und das Ende 0,25 km. Im Falle des 'Free'-Szenarios demonstrieren die raumzeitlichen Muster eine ideale Verkehrsqualität, indem alle Fahrzeuge in der Simulation

durchgehend freie Fahrt hatten. Im Falle des 'Congested'-Szenarios kann man starke Minderungen der Geschwindigkeiten erkennen, die durch drei nicht-kooperative Einfädelmanöver verursacht wurden. Diese Geschwindigkeitseinbrüche resultierten in starken Schockwellen, die an der Einfädelstelle anfangen und sich stromaufwärts ausbreiteten, bedeutend, dass mehrere Fahrzeuge bremsen mussten. Nachdem der eigentliche Einfädelvorgang abgeschlossen wurde und die Schockwelle sich auflöste, kehrte der Verkehrsfluss für eine bestimmte Zeit zum freien Zustand zurück. Im Falle des 'with CMC'-Szenarios sind die Variationen in der Geschwindigkeit beinahe unbemerkt, da die einfädelnden Fahrzeuge sich schnell mit dem gesamten Verkehrsfluss synchronisierten. Das Einfädeln selbst passierte dabei deutlich früher und verursachte nahezu keine Störungen für den Verkehr auf der Autobahn. Somit kann man deutlich die positive Wirkung der kooperativen Manöverplanung und -abstimmung auf die Verkehrsqualität erkennen.

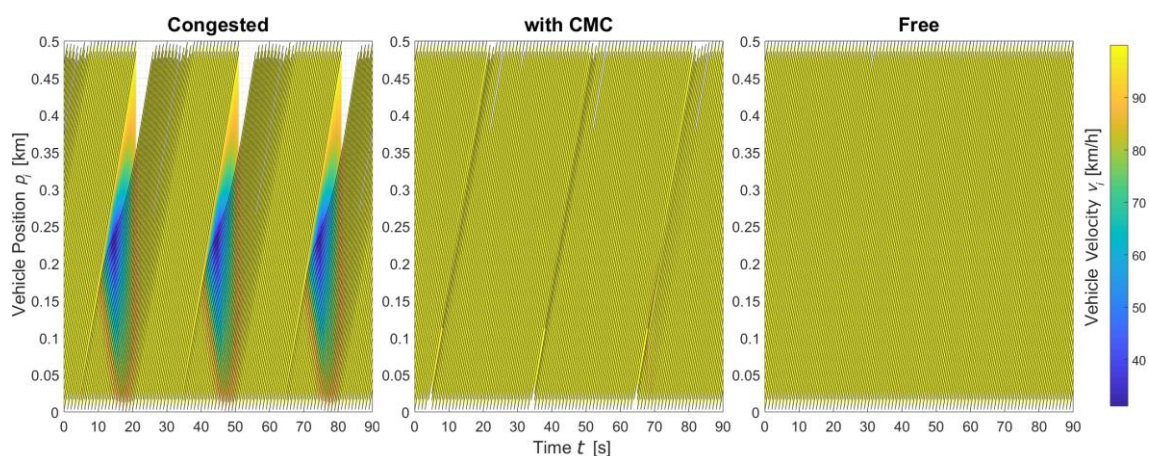


Abbildung 83: Ergebnis – raumzeitliche Muster [1]

4.4.2.4.1 Quellen

- [1] V. Lizenberg, D. Bischoff, Y. Haridy, U. Eberle, S. Knapp & F. Köster. "Simulation-Based Evaluation of Cooperative Maneuver Coordination and its Impact on Traffic Quality". *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*; vol. 3, no. 6, pp. 3159-3169; Technical Paper 2021-01-0171. 2021; doi: [10.4271/2021-01-0171](https://doi.org/10.4271/2021-01-0171).
- [2] V. Lizenberg, M.R. Alkurdi, U. Eberle & F. Köster. "Intelligent Co-Simulation Framework for Cooperative Driving Functions". *IEEE ICCP: 17th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*. 2021; Cluj-Napoca, Romania.

4.5 Ergebnisse Konzeptverifikation (BMW)

4.5.1 Verifikation GUA1 Konzept "IMAGinE 2018"

Das Vorgehen und die Arbeiten der BMW AG zur Verifikation des GUA1 Konzeptes "IMAGinE 2018" sind in den eigenen Beiträgen der Deliverables D3.2 und D4.4 beschrieben. Wie dort und in den Halbjahresberichten dargestellt, wurden folgende Ergebnisse erreicht:

1. Die gelieferte Aktivierung der GUA1-Funktion F1 wurde erfolgreich überarbeitet.

2. Damit wurde die GUA1-Funktion F1 in CarMaker simuliert in mehreren Ausprägungen:
 - a. Erster vollständiger Lieferstand vom Februar 2021
 - b. Als final gelieferter GUA1-Softwarestand vom 30.4.2021 mit mehreren Nachbesserungen bis 13.08.2021
 - c. Aktueller, in IMAGinE weiterentwickelter, GUA1-Softwarestand von November 2021, mit Ergänzungen v.a. des Projektpartners Continental
3. Die GUA1-Funktion F1 wurde in der Fahrsimulator-Software SPIDER simuliert mit folgenden Ergebnissen:
 - a. Erster vollständiger Lieferstand F1 vom Februar 2021: Es konnten nur optisch erfolgreiche Einschervorgänge, funktional jedoch ohne bestimmungsgemäße Kooperation des Folgefahrzeugs dargestellt werden
 - b. Software-Stand 30.4.21: keine Untersuchungen in SPIDER durchgeführt, da noch Probleme in CarMaker und schlechte Reprozierbarkeit wegen altem Synchronisationskonzept
 - c. Aktueller IMAGinE GUA1-Softwarestand von November 2021 mit neuem Synchronisationskonzept: erfolgreiche Integration und Simulation von Prüfscenarien an Autobahneinfahrten, jedoch bislang noch ohne bestimmungsgemäße Kooperationsgewährung
 - d. Gleiches Prüfscenario gemischt gefahren mit einem einfahrenden GUA1-Fahrzeug und mit durch Bbasic (s.u.) ausgerüsteten Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn: Bbasic-Fahrzeuge kooperieren bestimmungsgemäß auf Basis der vom GUA1-Fahrzeug versendeten MCM-Nachrichten

Im Ergebnis konnte mit dem Softwarestand 2c. eine erfolgreiche Kooperation nach Kooperationsanfrage und Kooperationsgewährung in einem angepassten Szenario mit 3 GUA1-Fahrzeugen (modifiziertes Szenario F1, 1. Szenario 2. Variante des Lastenhefts, kurz F112) dargestellt werden. Dies entspricht dem Ergebnis im Punkt 3, das auch der Projektpartner Continental dargestellt hat. Eine allgemeine Funktionalität auch in anderen Szenarien konnte dagegen bislang noch nicht erfolgreich dargestellt werden.

Zusammengefasst konnte in der Fahrsimulations-Software SPIDER die aktuelle GUA1-Software erfolgreich integriert werden. Die GUA1-Software kann dort auch in einfachen Simulatorszenarien Fahrzeuge steuern und Einschervorgänge an Autobahnauffahrten durchführen. Die bestimmungsgemäße Funktion von F1 mit aktiver Kooperationsunterstützung konnte im gleichen Umfang wie mit CarMaker nachgewiesen werden.

Insgesamt konnte BMW damit zu einer Teilverifikation des GUA1-Konzepts beitragen und entsprechende Ergebnisse des Projektpartners Continental bestätigen. Ein „proof-of-concept“ im ursprünglich gedachten Szenarienumfang war jedoch für das GUA1-Konzept "IMAGinE 2018" bis zur Erstellung dieses Deliverables in der Fahrsimulation noch nicht möglich.

Stattdessen wurde aus Ressourcengründen bis auf Weiteres die Verifikation des Bbasic-Konzepts priorisiert.

4.5.2 Verifikation Bbasic Konzept

Die Verifikation des in D3.2 technisch beschriebenen, bis November 2021 bei BMW umgesetzten Bbasic-Konzepts konnte wie geplant durchgeführt werden. Erfolgreiche, bestimmungsgemäß funktionierende Kooperationen wurden sowohl in 3-Fahrzeug-Prüfszenarien wie in größeren Szenarien mit bis zu 10 intelligenten, gleichzeitig kooperationsfähigen Fahrzeugen simuliert und aufgezeichnet.

BMW-Simulatorfahrzeuge können so konfiguriert werden, dass sie von einem sich fahrerähnlich verhaltenden Fahrermodell gesteuert werden. Das dabei verwendete Fahrerverhaltensmodell TRM ist parametrisierbar und agiert bzw. reagiert mit fahrerähnlichen Reaktionszeiten. TRM implementiert dabei auch fahrerähnliches Kooperationsverhalten auf Basis der eigenen, wahrnehmungsbasierten on-board Situationsbewertung.

Die neue IMAGinE-Manöverabstimmung über Manöverkoordinationsnachrichten ermöglicht einen schnellen Informationsaustausch, auf den automatisierte Fahrzeuge mit kurzen Reaktionszeiten reagieren können. Dafür wurde das TRM-Fahrermodell in IMAGinE erweitert und angepasst.

4.5.2.1 Vergleiche in kontrollierten Prüfsituationen

Die BMW-Simulation ermöglicht es, Prüfsituationen mit und ohne Manöverabstimmung oder mit unterschiedlichen Abstimmungsverfahren und Parametrisierungen miteinander zu vergleichen. Im Folgenden wird daher das kooperative Fahren des on-board Fahrerverhaltensmodell TRM als „Baseline“ dargestellt und den Ergebnissen der IMAGinE-Manöverabstimmung mit Bbasic gegenübergestellt.

4.5.2.2 Darstellung und Auswertung

Zur Funktionsprüfung simulierter Szenarios wurden Videos verwendet, in denen relevante Ereignisse und Planungen angezeigt werden. Im Folgenden sind aus diesen Videos beispielhaft relevante Zeitpunkte als Screenshots wiedergegeben. Ferner werden in der Fahrsimulation eine Vielzahl von Messdaten erfasst. Im Anschluss an die Screenshots werden relevante Variablen im Zeitverlauf dargestellt und verglichen.

Um einen anschaulichen Vergleich zwischen verschiedenen Simulationen zu ermöglichen, wurden für IMAGinE-Plotskripte erstellt, die unterschiedlich konfigurierte Simulationen eines Prüfszenarios im Zeitverlauf mit unterschiedlichen Farben darstellen. So werden in den folgenden Darstellungen Szenarien ohne und mit IMAGinE miteinander verglichen. „Ohne IMAGinE“ heißt, dass Fahrzeuge ohne Austausch von MCM-Nachrichten fahrerähnlich durch das TRM-Fahrerverhaltensmodell der Fahrsimulation miteinander kooperieren. „Mit IMAGinE“, heißt, dass TRM-Fahrzeuge zusätzlich MCM-Nachrichten austauschen und für ihre Fahrzeugsteuerung und Manöverkooperation berücksichtigen. Auf diese Weise können Veränderungen und Gewinne durch

den frühzeitigen IMAGinE MCM-Nachrichtenaustausch im Vergleich direkt nachvollzogen werden.

4.5.2.3 Proof-of-Concept Bbasic Kooperation mit drei Fahrzeugen

In den beiden folgenden Bildern wird die erfolgreiche Kooperation in einem einfachen 3-Fahrzeug Prüfszenario gezeigt:

1. Kooperation wird über eine Prinziptrajektorie in den Nachbarfahrstreifen angefragt
2. Kooperation wird vom Folgefahrzeug auf der Hauptfahrbahn schnell bestätigt („Grant“)
3. Das Fahrzeug auf Beschleunigungsspur beschleunigt und schert ein, Fahrzeug auf Hauptfahrbahn verzögert zeitgleich etwas.
4. Nach dem Einfädeln werden die Abstände normalisiert und vergrößern sich auf einen typischen Folgeabstand (z.B. Zeitlücke von ca. 1,3 Sekunden).

Bbasic kann die Intention indirekt durch die Übermittlung einer Prinziptrajektorie auf den neuen Zielfahrstreifen senden und empfangen, aber auch direkt durch einfache Übermittlung der Relativposition des neuen Zielfahrstreifens. Die Ergebnisse sind fast die gleichen. Da TRM-Fahrzeuge beim Empfang beide Möglichkeiten berücksichtigen, können sie sowohl mit anderen TRM-Fahrzeugen als auch mit GUA1-Fahrzeugen kooperieren. Im Folgenden ist zunächst eine Simulation mit Signalisierung des Kooperationsbedarfs durch eine "Prinziptrajektorie" dargestellt:

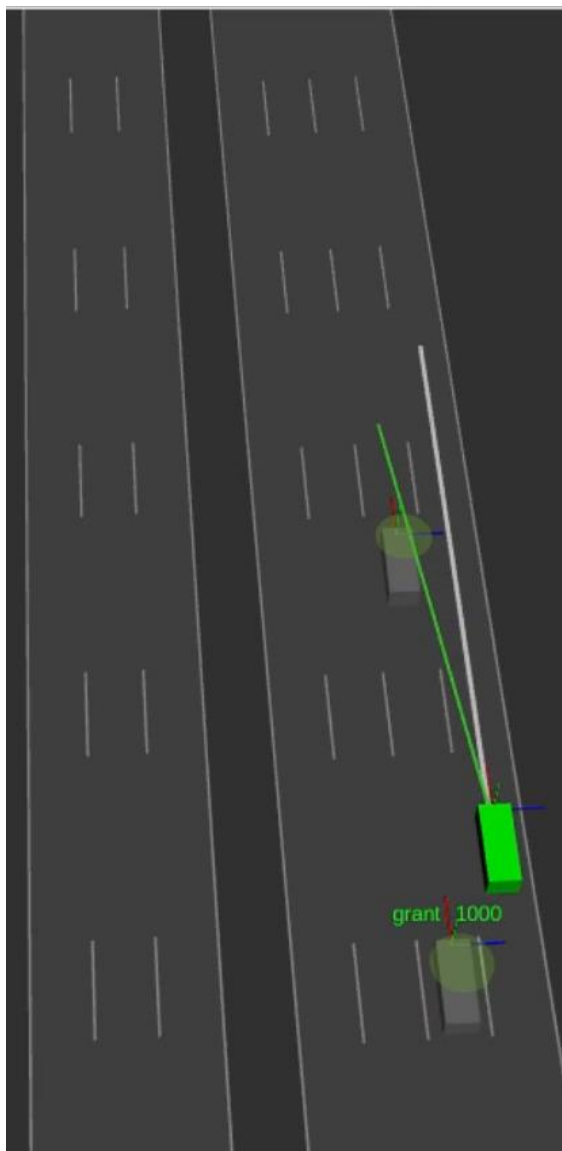


Abbildung 84: 3s: Kooperationszusage nach Anfrage mit Wechseltrajektorie

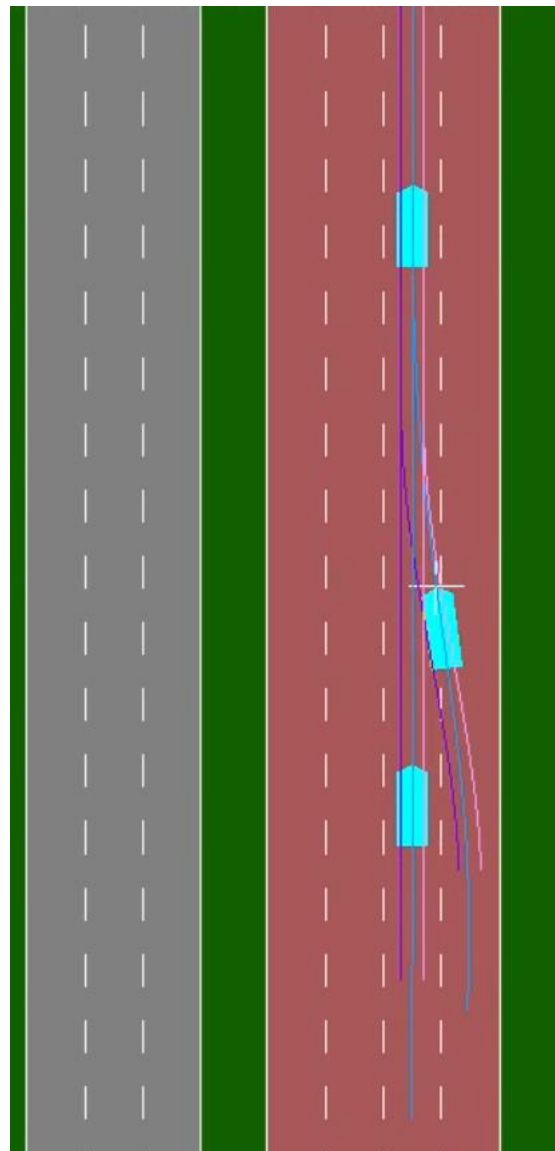


Abbildung 85: 7s: Einscheren nach Kooperation

Im oben dargestellten Szenario wird die Intention durch Übersendung einer – grün eingezeichneten – „Prinziptrajektorie“ auf die Mitte des linken Nachbarfahrstreifens signalisiert. Da die Adressierung des ausgewählten Kooperationspartners explizit erfolgt, muss die Prinziptrajektorie nicht genau eingehalten und gefahren werden, sondern sie signalisiert lediglich den Kooperationsbedarf. Die tatsächlich gefahrene Trajektorie richtet sich dagegen verkehrsabhängig nach der optimalen Abstandsregelung nach vorn und nach hinten während des Fahrstreifenwechsels.

Im unten dargestellten Szenario wird die Intention dagegen direkt durch Übersendung eines einzelnen MCM-Nachrichtenattributs „ich möchte um einen Fahrstreifen nach links wechseln“ signalisiert. Die Ausführung des Fahrstreifenwechsels richtet sich wiederum nach der optimalen Abstandsregelung nach vorn und nach hinten während des Fahrstreifenwechsels. Als tatsächlich

gefährtere Ego-Trajektorie ergibt sich damit in der gleichen Fahrsituation bei gleichem Fahrverhalten der Umgebungsfahrzeuge auch die gleiche Trajektorie wie oben, unabhängig von der Art, wie die Intention signalisiert wird:

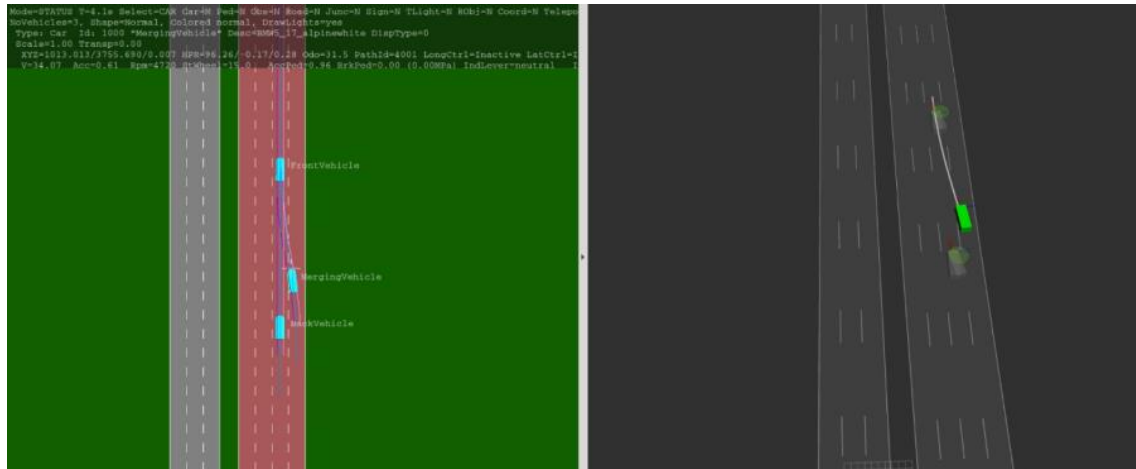


Abbildung 86: 7s: Einscheren nach Kooperation auf Anfrage mit Intention

Im Ergebnis reicht also die Kenntnis der Intention aus, um über die eigene Zustimmung zum gewünschten Einschervorgang auf Basis der tatsächlichen Fahrsituation selbst zu entscheiden und den Vorausabstand hinsichtlich der relevanten Kriterien - vor allem Fahrsicherheit und Effizienzaspekte - während des Einschierens zu regeln. Diese Regelung kann auch eigene Prädiktionen berücksichtigen, die in der konkreten Fahrsituation für ausreichend glaubhaft gehalten werden. Die Verantwortung für die eigene Manöverplanung verbleibt im eigenen Fahrzeug und wird nicht von Prädiktionen anderer Fahrzeuge abhängig gemacht.

In den nachfolgenden Darstellungen werden die IMAGinE-Kooperation über das „Bbasic“-Verfahren verglichen mit dem bordautonomen Kooperationsverhalten der TRM Fahrsimulator-Fahrzeuge zuvor, d.h. ohne Austausch und Auswertung von IMAGinE-Manöverkooperationsnachrichten.

4.5.2.4 Zeitpunkt des kooperativen Fahrstreifenwechsels

Durch die frühzeitige Kooperationsanfrage über IMAGinE MCM kann der kooperative Fahrstreifenwechsel im Prüfzenario ca. 1 Sekunde früher stattfinden als ein Einfädelvorgang ohne MCM. Ob ein Kooperationsbedarf per Trajektorie oder per Intention kommuniziert wird, macht für das Prüfzenario dabei praktisch keinen Unterschied:

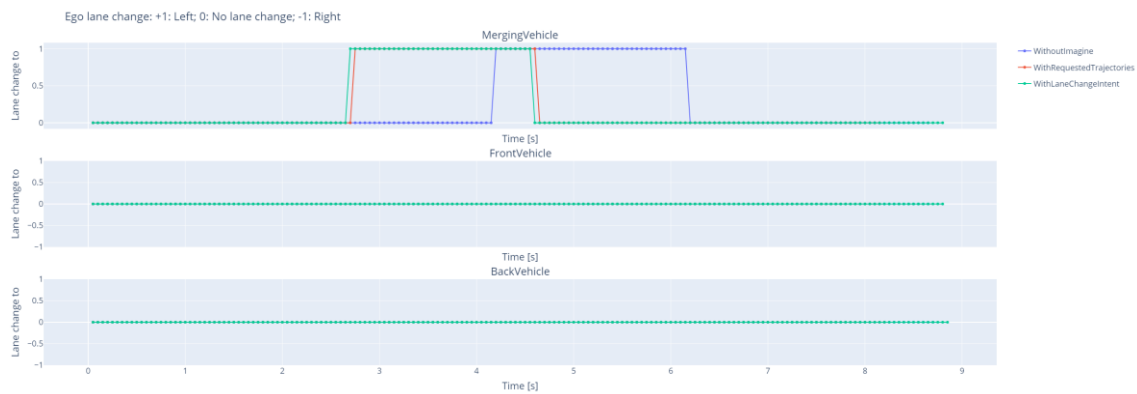


Abbildung 87: Früherer Fahrstreifenwechsel durch IMAGinE-Kooperation

4.5.2.5 Ausgeglichenes Beschleunigungsprofil

Durch die frühzeitige Kooperation ist im Prüfszenario das Beschleunigungsprofil des Folgefahrzeugs auf der Hauptfahrbahn hinter dem einscherenden Fahrzeug ausgeglichener. Unnötiges Beschleunigen vor dem Einschervorgang wird vermieden. Anschließend kann das Folgefahrzeug hinter dem beschleunigenden einscherenden Fahrzeug früher selbst wieder beschleunigen:

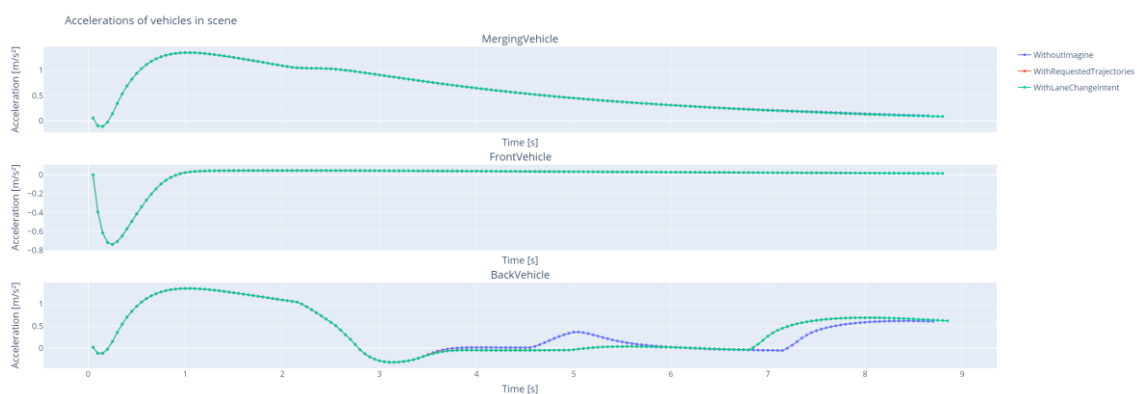


Abbildung 88: Ausgeglichenes Beschleunigungsprofil

4.5.2.6 Geringer Geschwindigkeitsverzicht über kurzen Zeitraum

Die frühzeitige Kooperation beinhaltet für das rückwärtige Fahrzeug nur einen geringfügigen Beschleunigungsverzicht über einen Zeitraum von ca. 2 ½ Sekunden:

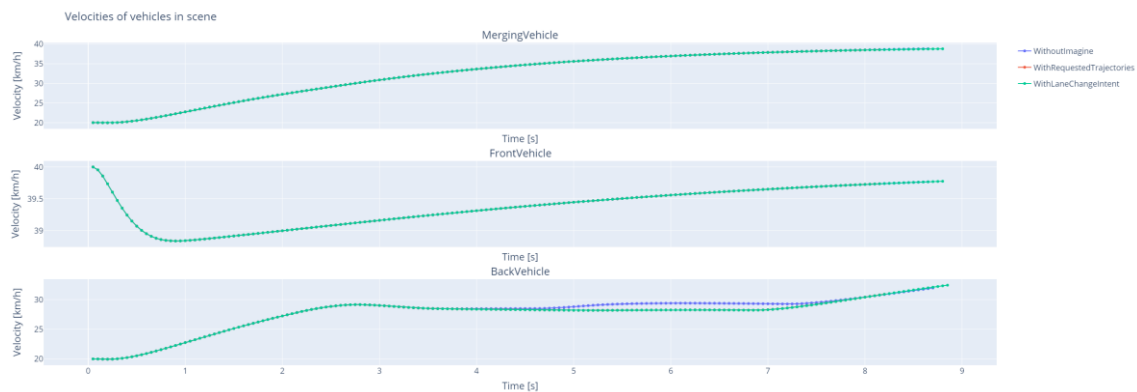


Abbildung 89: Geringer kurzzeitiger Geschwindigkeitsverzicht

4.5.2.7 Abstandshaltung während des kooperativen Fahrstreifenwechsels

Bei Beginn des verabredeten, kooperativen Spurwechsels wird der Fahrstreifenwechsel zu einem früheren Zeitpunkt mit einem etwas kürzeren Abstand als im Szenario ohne IMAGinE begonnen. Anschließend werden während des Einschervorgangs in die Lücke die Abstände vor und hinter dem einscherenden Fahrzeug wieder erhöht:

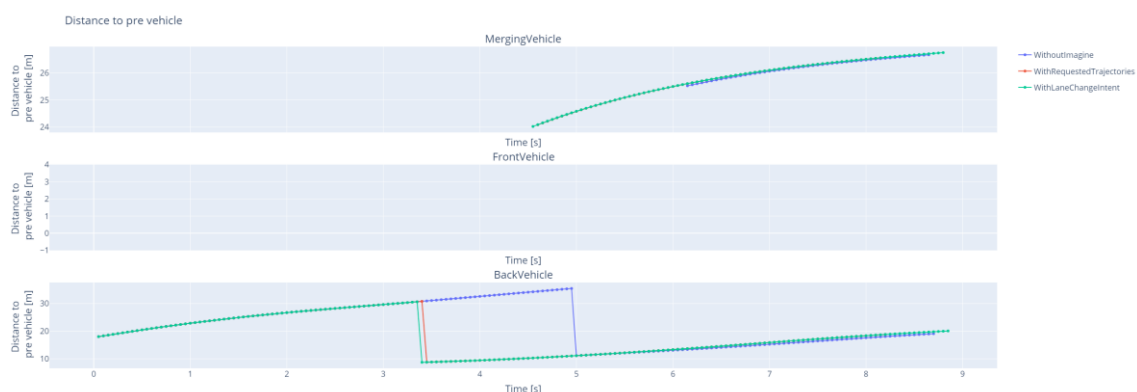


Abbildung 90: Abstandshaltung kooperativer Fahrstreifenwechsel

4.5.2.8 Zeitlücken während des kooperativen Fahrstreifenwechsels

Eine Zeitlücke ist definiert als Abstand geteilt durch die Eigengeschwindigkeit. Sie gibt die Zeit an, in der das Egofahrzeug die aktuelle Position des vorausfahrenden Fahrzeugs erreicht hat. Je schneller das Egofahrzeug fährt, desto proportional mehr Abstand zum Vorausfahrzeug muss es einhalten, um die gleiche Zeitlücke zu fahren. Die Empfehlung „Abstand halber Tacho“ entspricht einer Zeitlücke von 1,8 Sekunden als Sicherheitsabstand nach vorne. Im Verkehrsalltag werden im gebundenen oder dichten Verkehr auch geringere Zeitlücken von z.B. etwa 1,3 Sekunden gefahren. Zeitlücken von unter einer Sekunde werden in Deutschland regulativ sanktioniert, wenn sie nicht nur kurzzeitig gefahren werden (z.B. während eines Fahrstreifenwechsel in eine Lücke oder während eines Bremsvorgangs). Sind die Differenzgeschwindigkeiten beim Fahrstreifenwechsel gering, sind im Verkehrsalltag kurzzeitig kurze Zeitlücken von z.B. 0,3 Sekunden

keine Seltenheit. Diese müssen allerdings während und nach einem Fahrstreifenwechsel wieder auf einen erlaubten Folgeabstand > 1 Sekunde vergrößert werden.

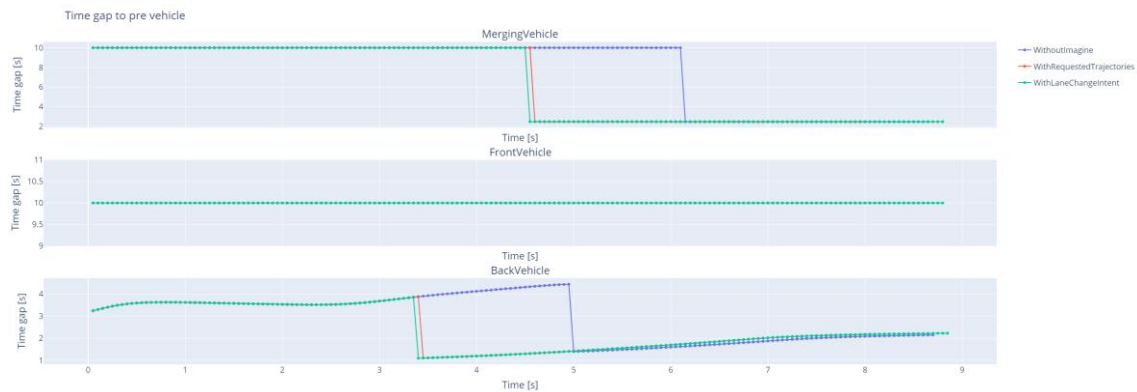


Abbildung 91: Sichere Zeitlücke

Im Prüfszenario wird während des gesamten Fahrstreifenwechsel eine sichere Zeitlücke von knapp über einer Sekunde eingehalten, die während und nach dem Fahrstreifenwechsel durch das Beschleunigen des Einscherers (in anderen Szenarien zusätzlich oder alternativ durch das Verzögern des Folgefahrzeugs) allmählich vergrößert wird.

Das Prüfszenario zeigt also einen sicheren kooperativen Fahrstreifenwechsel, in dem das Einscheren durch geringe, kurze Geschwindigkeitsanpassungen unterstützt wird.

4.5.2.9 Verifikation F1 an Autobahnauffahrt mit zehn Fahrzeugen

In der BMW-Fahrsimulation wurde unter anderem ein Simulationsszenario mit zehn mit Bbasic ausgerüsteten, intelligenten Fahrzeugen dargestellt und ausgewertet. In diesem Szenario werden parallel mehrere Kooperationen vereinbart und durchgeführt. Im Ergebnis entsteht durch paarweise Kooperationen ein erfolgreiches Reißverschluss-Einscheren in knappe Lücken. Beispielhafte Screenshots eines Videos sind im Folgenden wiedergegeben.

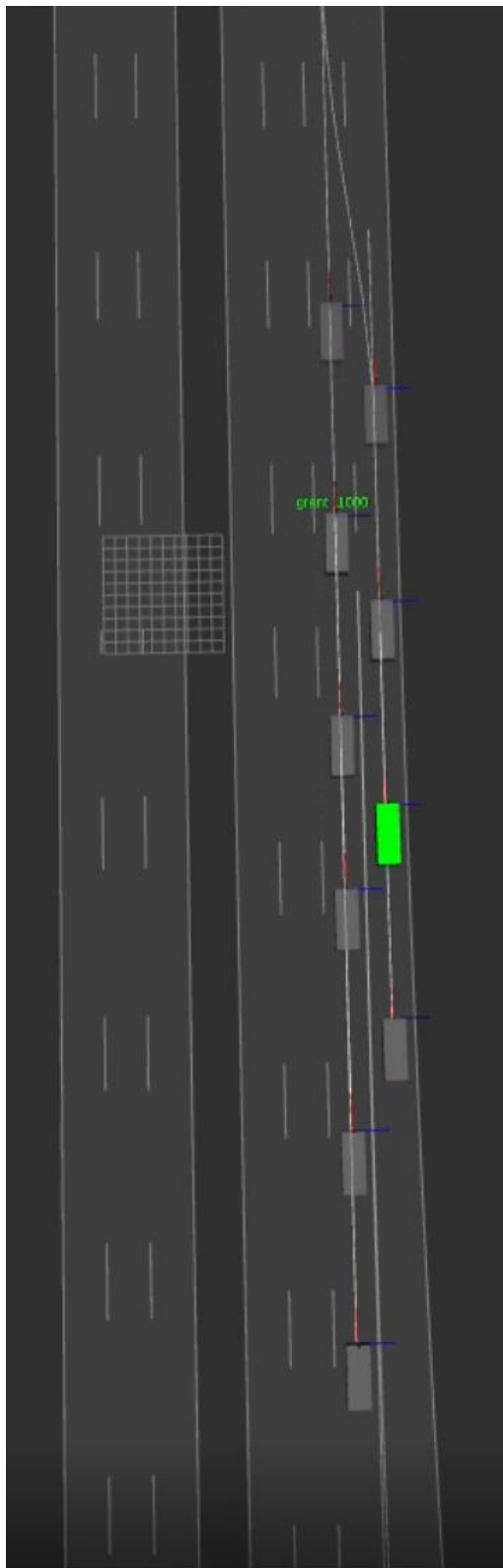


Abbildung 92: 5s: Erster Grant an vordersten Einscherer

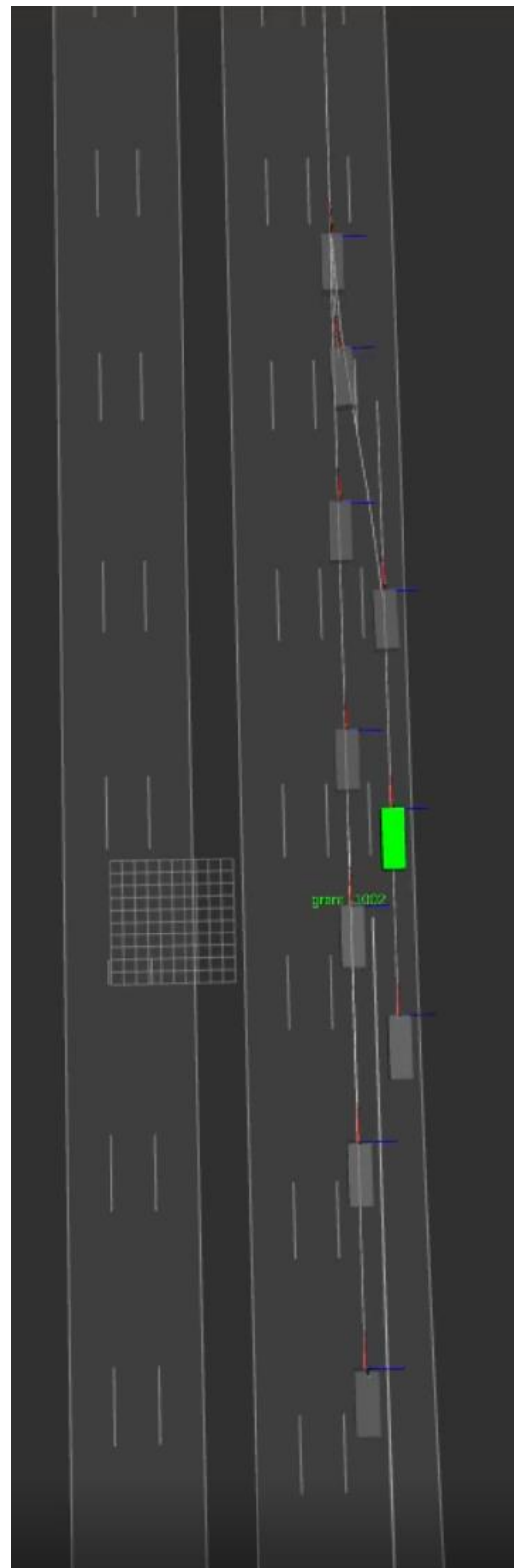


Abbildung 93: 8s: Zweiter Grant an zweiten Einscherer

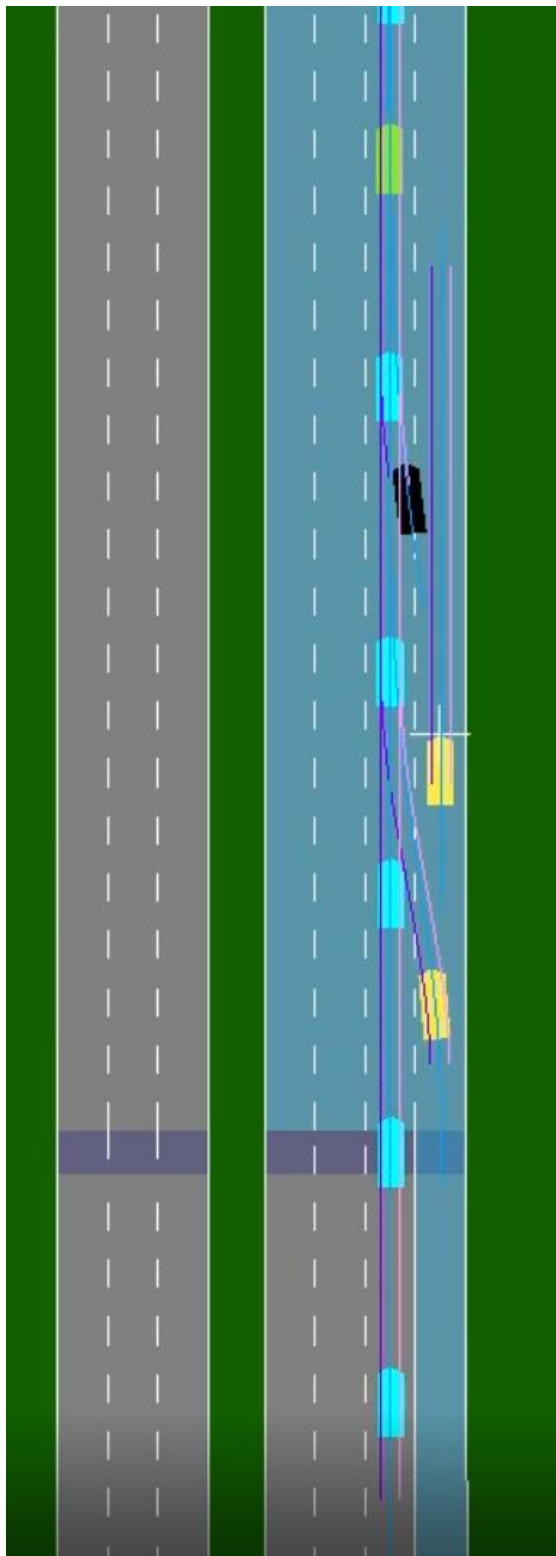


Abbildung 94: Parallel geplante und durchgeführte Fahrstreifenwechsel

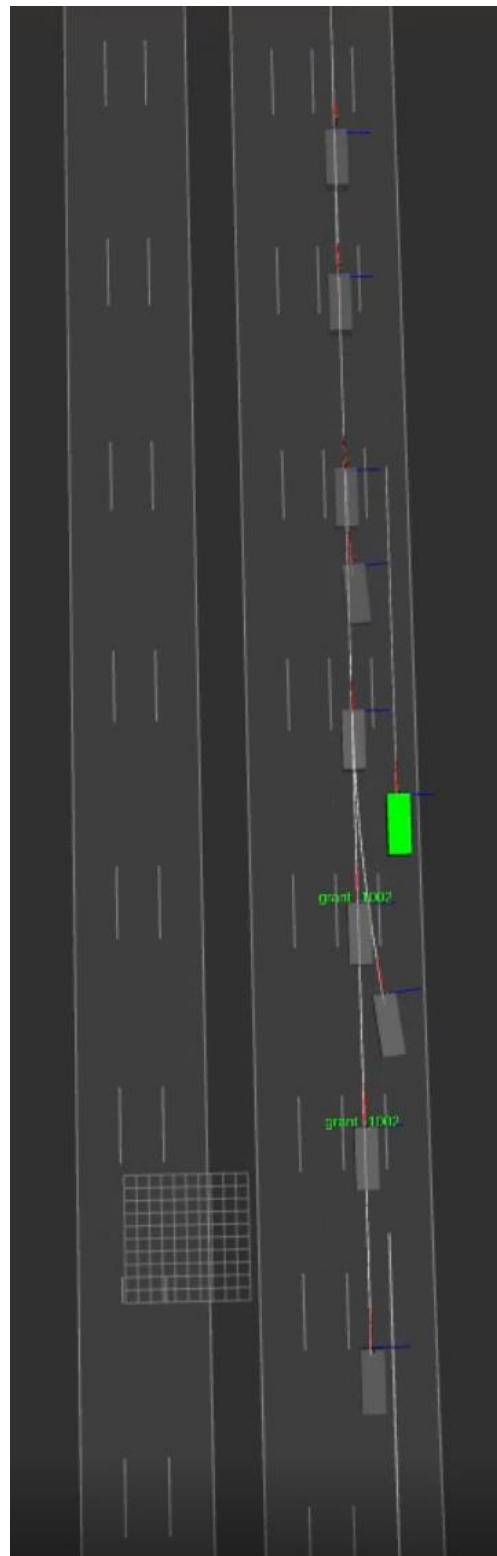


Abbildung 95: 11s: 3. Grant an dritten Einscherer durch zwei Fahrzeuge

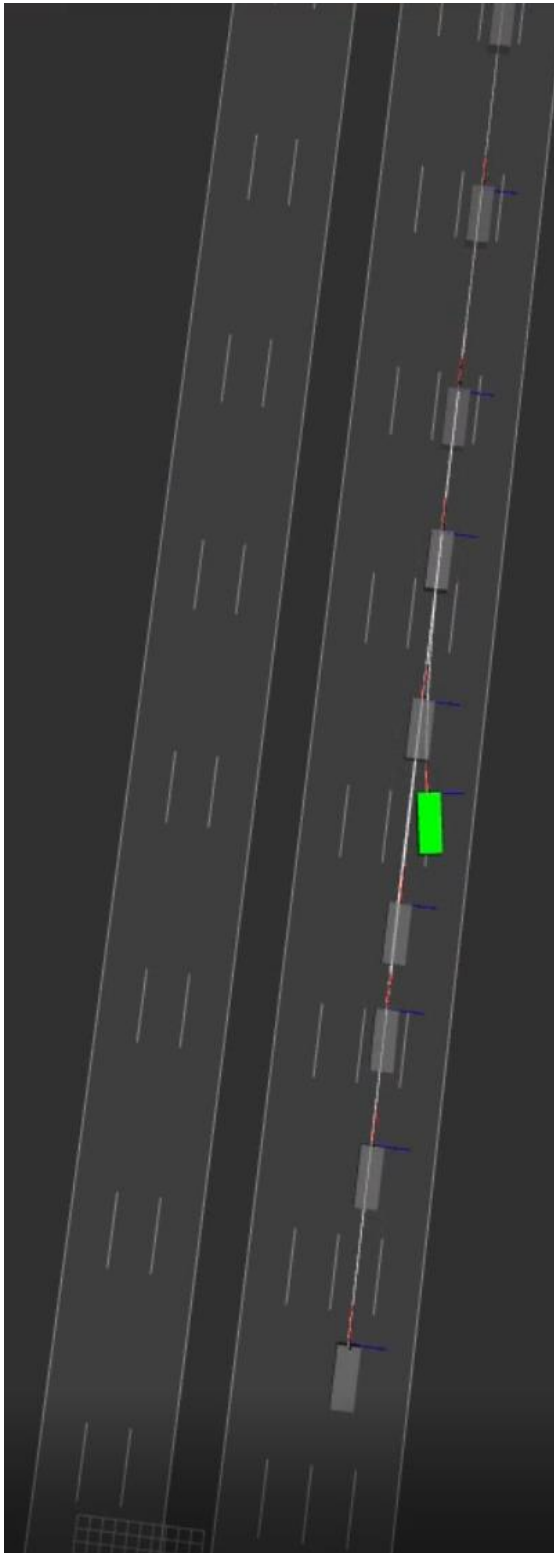


Abbildung 96: 15s: Einscheren in enge Lücke nach Abstimmung

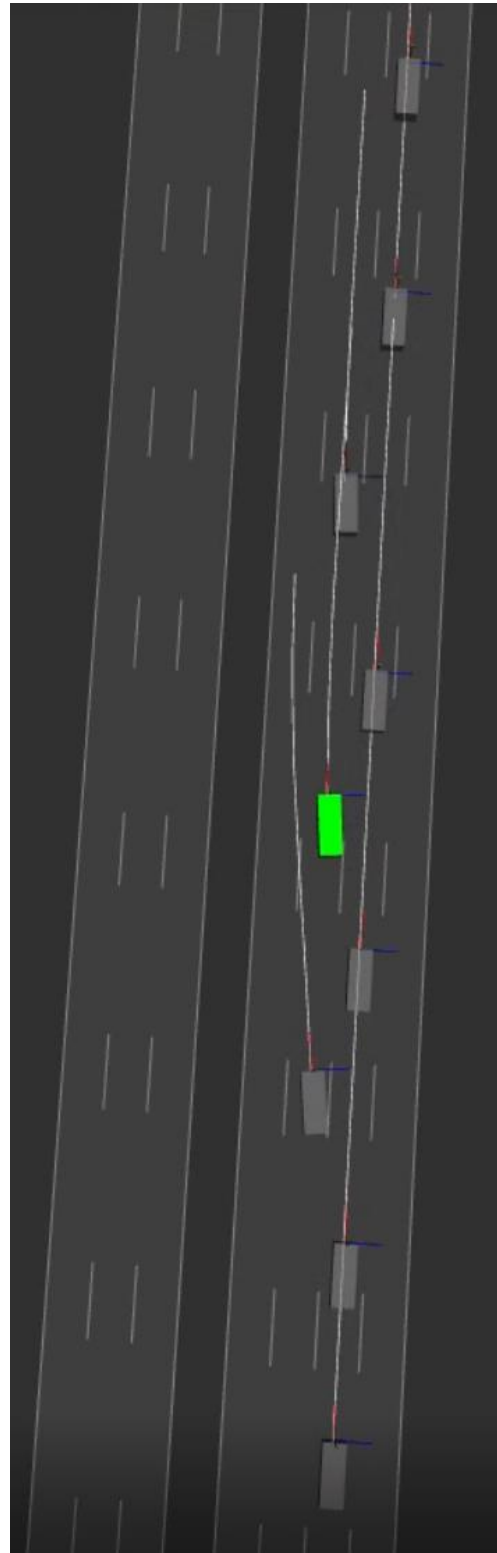


Abbildung 97: 20s: Vergrößerung der Abstände, Auflösung durch weiteren Fahrstreifenwechsel

4.5.3 Zusammenfassung der vorliegenden Ergebnisse

Durch die frühzeitige und schnelle Manöverabstimmung mit dem IMAGinE Bbasic-Verfahren wird erwartungsgemäß eine frühere Kooperation der Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn ermöglicht. Dadurch können Beschleunigungsprofile ausgeglichener verlaufen. In der aktuellen Auslegung wird dabei ein zu Einscherbeginn verkürzter, dennoch sicherer und sogar stationär regelkonformer Abstand mit einer Zeitlücke knapp über einer Sekunde während des ganzen Manövers eingehalten. Er wird kurz nach Einscherbeginn wieder vergrößert. Eine weitere Anpassung, beispielsweise zur Nutzung noch knapperer Lücken mit kurzzeitig weiter verkürztem hinteren Folgeabstand ist durch entsprechende Parameteränderungen am Abstandsmodell ebenso möglich wie die Einhaltung größerer Folgeabstände.

Die bei BMW durchgeführten Simulationen zeigen auch, dass kooperatives Fahren bei den untersuchten Einschervorgängen auch ohne schnellen IMAGinE-Nachrichtenaustausch funktioniert, indem der Kooperationsbedarf anderer Fahrzeuge über die eigene Sensorik erkannt wird, bewertet wird und dann über die Akzeptanzfähigkeit der Kooperation passend autonom entschieden wird. Das dafür eingesetzte, fahrerähnlich reagierende, parametrisierbare Fahrerhaltensmodell setzt dafür ausschließlich auf den aktuell bekannten Zustandsdaten und die eigene Situationsbewertung auf. Automatisierte Fahrzeuge können ebenso vorgehen.

4.6 Konzeptverifikation Mercedes-Benz AG/DCAITI

Der Proof-of-Concept des rollenbasierten Abstimmungskonzepts wurde seitens der Mercedes-Benz AG und dem DACITI in zwei unterschiedlichen Funktionen (F1, F2) durchgeführt.

4.6.1 F1 Proof of Concept

Für den Proof-of-Concept der Funktion F1 – Einfädeln an Autobahnanschlussstellen, wurde die Simulationsumgebung PHABMACS um ein Modul zur Kopplung von Simulation und Realdaten erweitert. Diese kann zuvor aufgenommene reale Fahrzeuge in der Simulation wiedergeben, so dass ein simuliertes „Echtwelt-Scenario“ entsteht. Mithilfe dieses Aufbaus wurde der Proof-of-Concept des Manöverabstimmungskonzeptes durchgeführt.

Nachfolgende Abbildung zeigt den Einfädelbereich in der Simulation. Die Umgebungsfahrzeuge, welche sich auf den Hauptfahrbahnen befinden, sind Fahrzeuge aus einem realen Datensatz. Die Fahrzeuge fahren die zuvor aufgenommene Trajektorie ab, wodurch unterschiedliche Manöversituationen entstehen. Das Ego-Fahrzeug befindet sich auf der Einfädelspur und wurde ebenfalls von dem Datensatz aufgezeichnet. In der Simulation wird das Ego-Fahrzeug durch ein simuliertes Fahrzeug ersetzt. Die Startbedingungen, wie die Geschwindigkeit, die Orientierung oder auch die Zeit des Erscheinens, wurden aus dem Realdatensatz entnommen. Somit kann ein Bezug zwischen dem Abstimmungskonzept in der Simulation und der im Realdatensatz erfolgten Abstimmung untersucht werden.

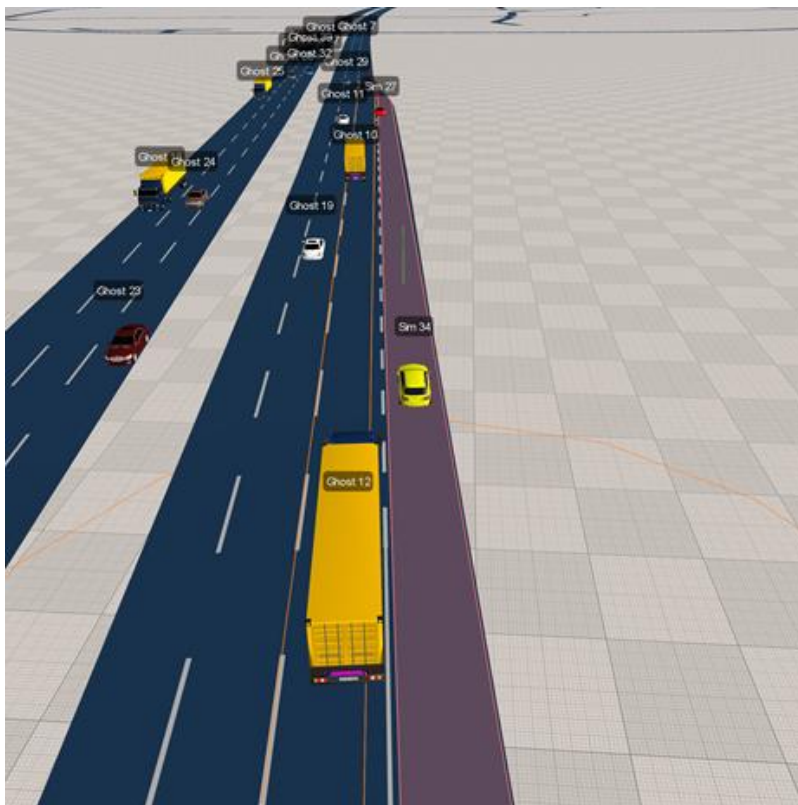


Abbildung 98: PHABMACS-Simulation Szenario Einfädeln

Um die State-Übergänge darzustellen, wurde der aktuelle State jedes Fahrzeugs in der Simulation als „Merge-State“ visualisiert. Die Informationen befinden sich übersichtlich und aneinander gereiht als Text-Boxen im unteren Simulationsbildschirm. Somit konnte der korrekte State-Ablauf geprüft und validiert werden. Nachfolgende Abbildung zeigt die State-Zustände der einzelnen Fahrzeuge.

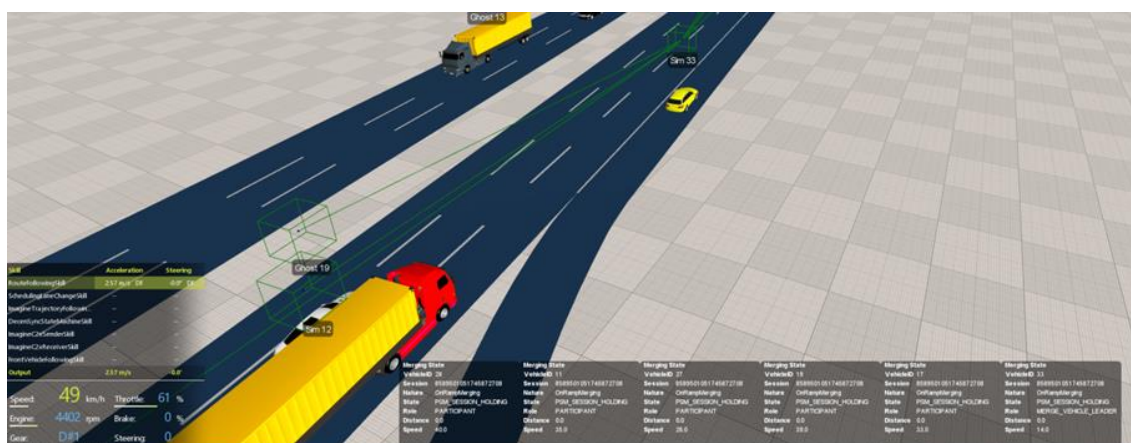


Abbildung 99: State-Zustände der Teilnehmer in der Simulation

Der Proof-of-Concept wurde mittels eines vereinfachten V2X-Modells durchgeführt. Die Nachrichten wurden mit einem Delay von 200ms vom Senden bis zum Empfangen belegt. Ferner wurde der Einfluss einer V2X-Package-Lost-Rate auf die Applikation untersucht. Hierfür wurden die Abbruchbedingungen, bspw. bei einem Ausfall des V2X-Moduls oder bei einem plötzlichen Kommunikationsabbruch mit einem Teilnehmer, implementiert und getestet. Zur Überprüfung des kooperativen Ansatzes wurden zwei Beispiel-Szenarien erstellt.

Im ersten Beispiel wurde das Geschwindigkeitsprofil der beteiligten Fahrzeuge ohne Unterstützung der Kommunikation aufgenommen. Nachfolgendes Diagramm stellt die aufgenommenen Messdaten der Simulation dar.

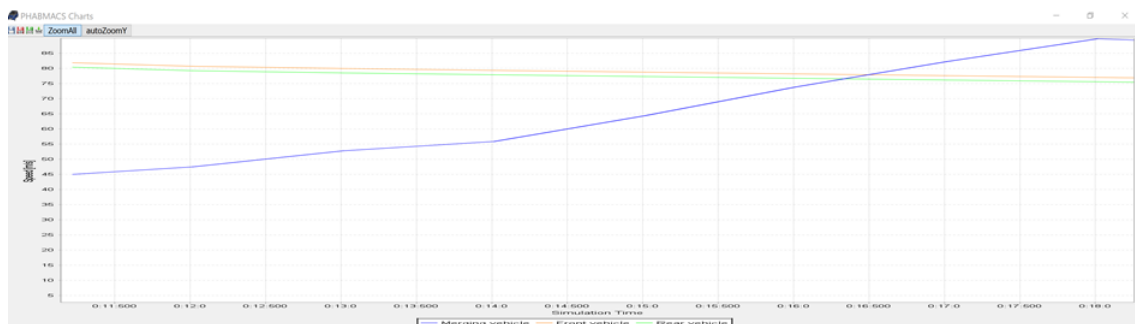


Abbildung 100: Geschwindigkeitsdiagramm ohne Kooperation

Wie zu sehen, wird das Ego-Fahrzeug (blau) mit einer initialen Geschwindigkeit von 45 km/h im Szenario erstellt. Die Geschwindigkeit wird im Rahmen des Einfädelprozesses auf ca. 90 km/h erhöht. Die beiden Lkw fahren nahezu mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 80 km/h auf der rechten Hauptfahrbahn. Anhand des erweiterten Umfeldmodells kann sich das Ego-Fahrzeug recht früh für eine Lücke entscheiden und diese im Trajektorienplaner fokussieren. Dies verdeutlicht das ansteigende Geschwindigkeitsprofil.

Wird nun das gleiche Beispiel mit einer aktiven V2X-Kommunikation durchgeführt, zeigt sich das kooperative Verhalten. Durch die frühzeitige Kommunikationsaufnahme (ab Simulationszeit: 12 s) mit den möglichen Teilnehmern sowie der Verhandlung der jeweiligen Fahrzeugrollen (Vorder- und Rückfahrzeugs) zeigt sich ein kooperatives Verhalten in der Simulation.

Sind die Rollen ausgehandelt, bewegen sich die Fahrzeuge rollen-adäquat. Das Vorderfahrzeug (orange) beschleunigt ein wenig, falls diese eine freie Fahrbahn und genug Abstand zu dessen Vorderfahrzeug hat. Das hintere Fahrzeug (grün) wird keine Beschleunigungen mehr vornehmen und die Geschwindigkeit konstant bzw. ggf. leicht reduzieren (segeln). Diese kleinen Reaktionen wirken sich stark auf die Einfädelparameter aus. Somit kann mit einem noch ruhigeren bzw. konstanterem Geschwindigkeitsprofil die Lücke erreicht werden. Die kleinen kooperativen Manöver der Verkehrsteilnehmer wirken sich positiv auf den Einfädelvorgang aus.

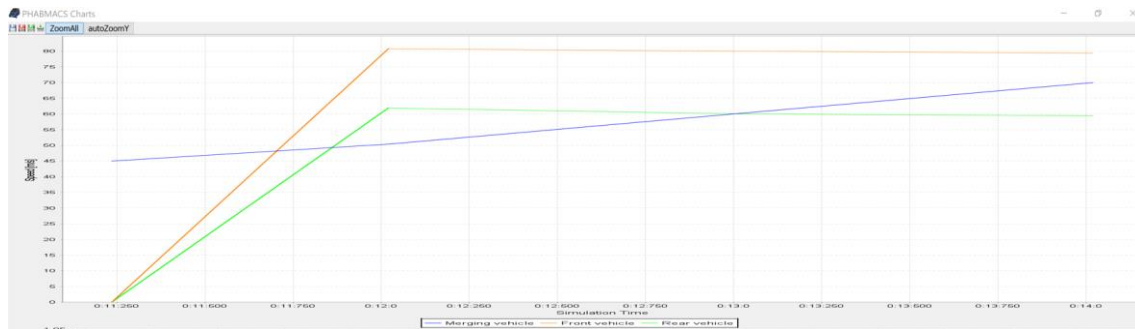


Abbildung 101: Geschwindigkeitsdiagramm mit Kooperation

Die Untersuchungen wurden an weiteren Beispielen in der Simulation durchgeführt, wobei ähnliche Verbesserungen erzielt werden konnten. In weiteren Arbeiten soll später die Simulationsumgebung mit dem Manöverabstimmungskonzept über eine Netzwerksimulation erweitert werden, um die Grenzen des Konzeptes sowie die Realisierbarkeit mit dem heutigen Stand der Technik im Bereich der Kommunikation zu prüfen.

4.6.2 F2 Proof of Concept

Die Simulationsumgebung PHABMACS wurde um die Fahrfunktion „Platooning“ erweitert. Fahrzeuge, welche mit dieser Funktion ausgerüstet sind, können via V2X Platoons beitreten, sie initiieren und wieder verlassen. In IMAGinE wurden nachfolgende Platoon-Szenarien erstellt.

- Bilden eines Platoons
- Auflösen eines Platoons
- Mittleres Fahrzeug löst sich aus dem Platoon

Diese Szenarien wurden in der Simulation umgesetzt und getestet. Nachfolgende Abbildung zeigt die Simulationsumgebung PHABMACS mit drei Fahrzeugen, welche im Platooning fahren. Jedes Fahrzeug ist mit einer V2X-Kommunikationsschnittstelle ausgerüstet, worüber Fahrzeug 1 (rot) eine Anfrage zum Platooning sendet.



Abbildung 102: Platooning wird gebildet

Die anderen Fahrzeuge akzeptieren dieses und ordnen sich im Platoon ein. Hierfür werden die Abstände minimiert. Das mittlere Fahrzeug hat nun den gleichen Abstand zu Vorder- und Hinter-Fahrzeug.



Abbildung 103: Platooning ist aktiv – Fahrzeuge mit gleichem Abstand

Die Kästen und Striche symbolisieren den Austausch über die Kommunikationsschnittstelle der Fahrzeuge. Die Farben zeigen den aktuellen Zustand des jeweiligen Fahrzeugs. Die Legende hierzu befindet sich im oberen Bereich des Bildes. Wie zu sehen, befinden sich die Fahrzeuge in Abbildung 103 im Platoon-State „Drive“.

Das Platooning lässt sich ebenfalls an dem nachfolgenden Diagramm der Messdaten zeigen.

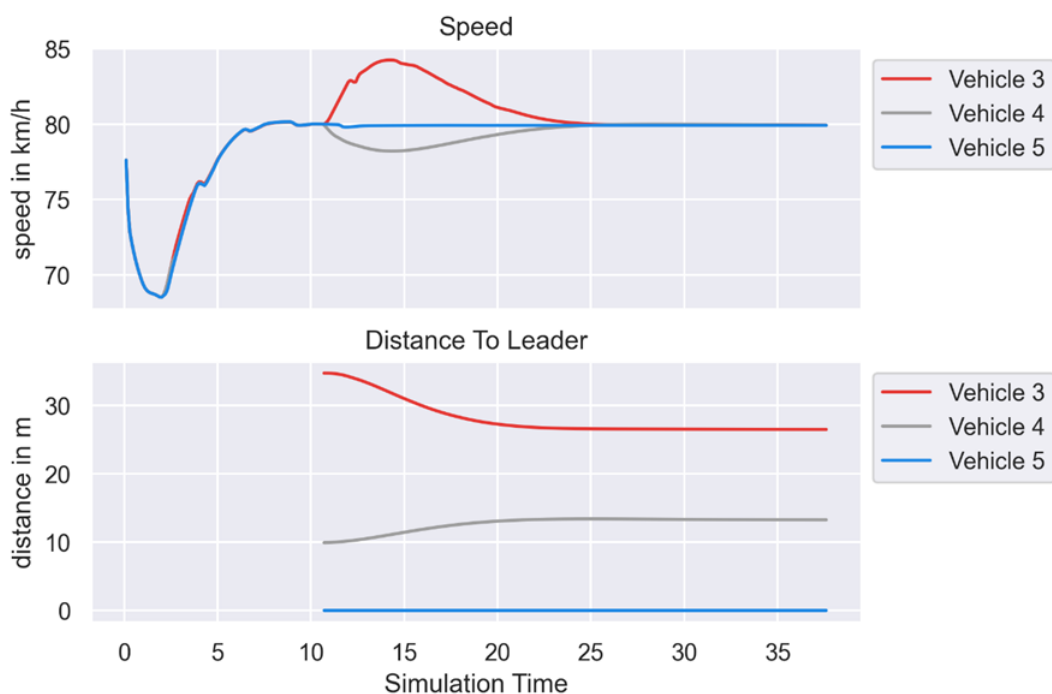


Abbildung 104: Geschwindigkeit und Distanz-Messung im Szenario Platooning

Zu Beginn des Szenarios (10s) befinden sich die Fahrzeuge bei ähnlicher Geschwindigkeit, jedoch mit unterschiedlichen Abständen zum Vorderfahrzeug. Nach der Anfrage sowie der Bestätigung aller anderen Verkehrsteilnehmer zum Platoon, nähert sich das letzte Fahrzeug den Vorderfahrzeugen. Das mittlere Fahrzeug positioniert sich genau mittig zwischen den Platooning-Teilnehmern. Diese lässt sich aus dem Geschwindigkeitsprofil und dem Distanzprofil ebenfalls erkennen. Das hintere Fahrzeug (rot) erhöht seine Geschwindigkeit, um die Lücke zu verkleinern – hierdurch wird der Abstand zum Vorderfahrzeug geringer. Das mittlere Fahrzeug (grau) reduziert leicht seine Geschwindigkeit, sodass die Distanz zum Vorderfahrzeug vergrößert wird. Am Ende des Szenarios (25s bis 40s) fahren die Fahrzeuge im Platoon, mit gleicher Geschwindigkeit und gleichem Abstand zueinander.

4.7 Konzeptverifikation Autobahn GmbH

Die Konzeptverifikation der Funktion F4 besteht aus zwei Komponenten: Zum einen wird die Umsetzung der F4 im Fahrzeug und dabei im Speziellen die Berechnung des EgoScores als Kernstück der Routenauswahl anhand dreier Testfälle validiert. Zum anderen wird die verkehrliche Wirkung der F4 in einer makroskopischen Verkehrssimulation untersucht.

4.7.1 F4 Funktionsvalidierung im Fahrzeug

Wie in Konzeptvorstellung Autobahn GmbH (D2.5) im Abschnitt "Manöverabstimmung" beschrieben, wird die Routenwahl der Fahrzeuge bei der kooperativ-strategischen Verkehrsverteilung anhand eines Vergleichs der individuell von jedem Fahrzeug berechneten EgoScores entschieden. Die Score-Berechnung stellt damit den entscheidenden Baustein der Routenauswahl dar.

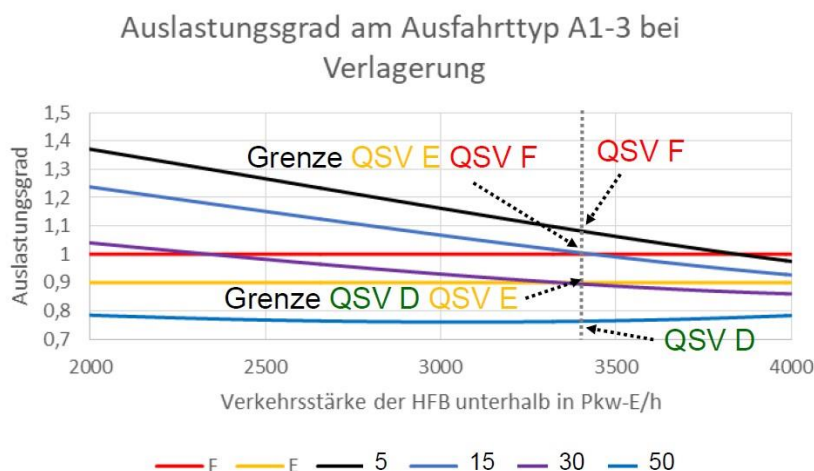
Zur Validierung der Score-Berechnung werden die score-beeinflussenden Parameter geändert und überprüft, ob das Abstimmungsergebnis, bei dem die Routenwahl der Fahrzeuge entschieden wird, mit dem erwarteten Ergebnis übereinstimmt. Zum einen werden hierbei die beiden Extremfälle untersucht. Das heißt die Parameter werden so gewählt, dass eine Weiterfahrt des betrachteten Fahrzeugs auf der Hauptstrecke erwartet wird (Testfall 1) bzw. so gewählt, dass eine Abfahrt auf die Alternativroute erwartet wird (Testfall 2). Zum anderen wird der Fall untersucht, dass alle Fahrzeuge exakt den selben Score besitzen (Testfall 3). Die genaue Auflistung der Parameter, sowie eine Auswertung der Testfälle ist im Deliverable D4.4 (Autobahn (D4.4)) zu finden.

4.7.2 F4 Verkehrliche Wirkung

Hauptziel des F4-Konzepts ist eine optimierte Verteilung des Verkehrs auf die Routenoptionen, so dass Verkehrsbehinderungen vermieden und die verfügbaren Kapazitäten auf den Autobahnen und im Basisnetz genutzt werden. Hinsichtlich der Funktionsweise von F4 liegt der Schwerpunkt des erwarteten Ergebnisses auf den Auswirkungen auf den großräumigen Verkehrszustand. Da es nicht möglich ist, diesen Effekt im Rahmen von Teststrecken nachzuweisen, können

hierzu klassischerweise makroskopische Verkehrssimulationen eingesetzt werden. Um den Nutzen der Funktion F4 zu verifizieren, wurde somit eine makroskopische Simulation entwickelt, die reale Szenarien auf deutschen Autobahnen darstellt. Für die Modellierung und Auswertung wurden in verschiedenen Schritten des Vorgehens die in Deutschland geltenden technischen Regelwerke sowie statistische Daten berücksichtigt, soweit diese zutreffend und umsetzbar sind. Beispiele hierfür sind:

- Nachfrage-Modell (Aktivitäten, Reiserouten und O-D Matrizen) anhand von statistischen Verkehrsteilnehmerdaten:
 - Zusammensetzung der Fahrzeuggruppen sowie die jeweilige Fahrleistung (Verkehr in Kilometern - VK) nach Kraftfahrt-Bundesamt Statistik 2021
 - Verkehrsverhalten nach bundesweiter Befragung Mobilität in Deutschland (MiD) 2017 des BMVI
- Infrastruktur-Modell (Räumliche und zeitliche Struktur des Verkehrssystems und dessen Elemente)
 - Typisierung der Knotenpunkte, Schnellstraßen und des untergeordneten Netzes nach den *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)*. Dies ist insbesondere für die Erzeugung von Kenngrößen im Auswertungsschritt relevant, gibt aber auch die anwendbaren Tempolimits, Anzahl der Fahrstreifen usw. vor.
- Analyse
 - Die verkehrstechnische Auslegung von Autobahnen in Deutschland erfolgt auf der Grundlage des *Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS* (2015). Hierzu gehört auch die Qualität des Verkehrsablaufs auf Autobahnen (*Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs QSV*). Im Rahmen der Auswertungen in AP5.3 werden die Auswirkungen von Verkehrsverlagerungen nach F4 untersucht und entsprechende Aussagen nach der QSV-Qualifikationsskala im HBS bewertet. Ein Beispiel hierfür ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs werden in Stufen A (gute Verkehrsqualität) bis F (schlechte Verkehrsqualität) eingeteilt.



- Evaluationen und erzeugte Kenngrößen nach dem Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030
 - Veränderung der Betriebskosten
 - Veränderung der Abgasbelastungen nach HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport)
 - Veränderung der Verkehrssicherheit
 - Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr
- Ermittlung q-V-Diagramme für gestörten Verkehrsablauf mittels mikroskopischer Simulation (VISSIM) als Eingangsparameter für makroskopische Simulation für Kalibrierung der Stauwellengeschwindigkeiten, gefahrenen Geschwindigkeiten und Kapazitäten

Mit Hilfe von mehreren Untersuchungsfällen bzw. -szenarien wurde schrittweise die Einsetzbarkeit von F4 in verschiedenen Konfigurationen untersucht, unter anderem auch im Vergleich zu klassischen Verkehrsbeeinflussungspraktiken. Die detaillierte Beschreibung hierzu, einschließlich der makroskopischen Simulationsumgebung und Ergebnisse erfolgt im Deliverable D5.3.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Arbeitspaket AP2.5 hatte zum Ziel, die im Rahmen des Teilprojekts 2 (TP2) durchgeführten Arbeiten zusammenzufassen und aufzuarbeiten. In dem dazugehörigen Deliverable D2.5 wurden die gemeinsamen IMAGinE-Komponenten als Gesamtsystem dargestellt und notwendige, sich aus den Ergebnissen der Simulation ergebende Anpassungen aufgezeigt. Darüber hinaus wurden alle in IMAGinE erarbeiteten Ansätze und Konzepte zur Manöverkoordinierung der einzelnen Projektpartner aufbereitet, geprüft und die Ergebnisse dargestellt.

Durch die Arbeiten des Teilprojekts TP2 konnte eine gemeinsame Rahmenspezifikation und gemeinsame Schnittstellen für die IMAGinE-Funktionen F1 bis F6 bereitgestellt werden. Eine darauf basierende, im gemeinsamen Unterauftrag GUA1 realisierte Implementierung des gemeinsam spezifizierten, trajektorienbasierten Manöverabstimmungsverfahrens „IMAGinE 2018“ liegt vor. Der ursprünglich im Arbeitspaket AP2.5 geplante „proof-of-concept“ der Manöverabstimmung konnte anhand des GUA1 nach Nachbesserungen nur in einzelnen Prüfsituationen erfolgreich durchgeführt werden. Die Reife der Implementierung war für eine tiefere Bewertung unzureichend.

Daher wurde der in AP2.5 geforderte "proof-of-concept" durch die einzelnen Projektpartner für die im Rahmen von IMAGinE entstandenen Manöverabstimmungskonzepte durchgeführt. Die Basisimplementierungen der einzelnen Manöverplaner und Abstimmungskonzepte wurden in verschiedenen Simulationsumgebungen in einer Reihe von Testszenarien für mehrere kooperative IMAGinE-Funktionen verifiziert. Zudem wurden die gemeinsamen Komponenten der IMAGinE-Architektur als Gesamtsystem dargestellt und notwendige Anpassungen, welche sich als Ergebnis aus der Simulation ergeben, aufgezeigt. Der "proof-of-concept" wurde von jedem Partner für das jeweilige Manöverabstimmungskonzept spezifisch durchgeführt und dokumentiert. Dabei sind sowohl die angewandten Methoden der Verifikation, als auch die Auswahl der verwendeten IMAGinE-Funktionen und -Szenarien partnerspezifisch. Die Basis der in IMAGinE umgesetzten Manöverabstimmungskonzepte ist allerdings über alle Arbeiten gleich. Dazu dient die allgemeine IMAGinE-Architektur, das kooperative Umfeldmodell aus dem gemeinsamen Unterauftrag 2 (GUA2) sowie das Kommunikationsmodul. Die Beschreibung der technischen Grundlagen findet sich in Kapitel Technischer Rahmen (D2.5).

Im Laufe der Bearbeitung des AP2.5 wurden die partnerspezifischen Manöverabstimmungskonzepte aus IMAGinE in Simulatoren integriert und anhand von den sechs kooperativen Manöverfunktionen verifiziert. Eine Übersicht über die verwendeten Manöverabstimmungskonzepte und die von den verschiedenen Projektpartnern verwendeten Funktionen finden sich in Kapitel Beschreibung Konzept der IMAGinE kooperativen Manöverabstimmung (D2.5).

Zusammenfassend über alle Partner kann gesagt werden, dass die genannten konzeptiellen Ansätze mit dem in AP2.5 durchgeführten "proof-of-concept" als Konzeptstudie erfolgreich verifiziert werden konnten. Mit allen Konzepten konnten in Simulation und/oder im Fahrzeug erfolgreich Kooperationen anhand der verschiedenen Funktionen durchgeführt werden. Die Projekt-

partner haben aus ihren Simulationsergebnissen für die aus dem GUA1 verfügbare Implementierung und für die partnerspezifischen Algorithmen erfolgreich Anpassungen abgeleitet und das System in den folgenden Arbeitspaketen stetig weiterentwickelt.

Die in AP2.5 integrierten Konzepte werden an die Arbeitspakete 5.3 und 5.4 zur weiteren Evaluation der Untersuchungsgegenstände übergeben.