



IMAGine

Deliverable 1.2 Use Case-Analyse

AP1.2 Use Case-Analyse

Version:	v1.0
Editor:	WIVW GmbH
Projektkoordination:	Opel Automobile GmbH
Fälligkeitsdatum:	28.02.2017
Erstellungsdatum:	31.03.2017
Veröffentlichung:	31.07.2017

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DOKUMENTENINFORMATION

AUTOREN

Reza Balaghiasafi (VW)
Harald Berninger (OPEL)
Bernd Büchs (OPEL)
Maxim Dolgov (BOSCH)
Monique Engel (VW)
Jana Fank (TUM)
Dr. Hendrik Fuchs (BOSCH)
Dr. Stefan Gläser (VW)
Thomas Grotendorst (CONTI)
Dr. Anna Julia Karmann (MAN)
Sandra Kleinau (VW)
Christian Knies (TUM)
Ann-Kathrin Kraft (WIVW)
Dr. Christian Maag (WIVW)

Ignacio Llatser (BOSCH)
Dr. Thomas Michalke (BOSCH)
Lorenz Prasch (TUM)
Jakob Reinhardt (TUM)
Oliver Sawade (DCAITI)
Bernd Schäufele (DCAITI)
Christian Schlotter (Hessen Mobil)
Jonas Schönichen (CONTI)
Marc Simon (CONTI)
Peter Strauß (MAN)
Dr. Sebastian Strunck (CONTI)
Tito Tang (MAN)
Sebastian Völl (MAN)
Dr. Peter Zahn (BMW)

REVIEWER

Dr. Anna Julia Karmann (MAN)
Maxim Dolgov (BOSCH)
Dr. Peter Zahn (BMW)

KONTAKT

Dr. Christian Maag
WIVW Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften GmbH
Robert-Bosch-Straße 4
97209 Veitshöchheim
Tel.: +49-931-78009-114
E-Mail: maag@wivw.de

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	12
1 Funktion 1: Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen	15
1.1 Beschreibung	16
1.1.1 Use Cases und Szenarien	16
1.1.2 Priorisierung von Use Cases	20
1.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung	20
1.2 Funktionszerlegung	21
1.2.1 Fahrersicht	22
1.2.2 Fahrzeugsicht	26
1.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen	32
1.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands	33
1.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung	34
1.4 Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände	35
2 Funktion 2: Kooperative Längsführung auf Autobahnen	39
2.1 Beschreibung	39
2.1.1 Use Cases und Szenarien	42
2.1.2 Priorisierung von Use Cases	45
2.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung	45
2.2 Funktionszerlegung	47
2.2.1 Fahrersicht	48
2.2.2 Fahrzeugsicht	52
2.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen	61
2.4 Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände	64
3 Funktion 3: Kooperatives Überholen auf Landstraßen	66
3.1 Beschreibung	66
3.1.1 Use Cases und Szenarien	66
3.1.1 Priorisierung von Use Cases	68
3.1.2 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung	68
3.2 Funktionszerlegung	70
3.2.1 Fahrersicht	71

3.2.2 Fahrzeugsicht	74
3.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen	81
3.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands	81
3.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung	82
3.4 Funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände	82
4 Funktion 4: Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung	84
4.1 Beschreibung	84
4.1.1 Use Cases und Szenarien	85
4.1.2 Priorisierung von Use Cases und Szenarien	86
4.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung	86
4.2 Funktionszerlegung	87
4.2.1 Fahrersicht	89
4.2.2 Fahrzeugsicht	92
4.3 Gestaltungsempfehlungen bezüglich MMI-Konzept	101
4.4 Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände	101
5 Funktion 5: Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen	103
5.1 Beschreibung	103
5.1.1 Use Cases und Szenarien	103
5.1.2 Priorisierung von Use Cases und Szenarien	107
5.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung	107
5.2 Funktionszerlegung	112
5.2.1 Fahrersicht	114
5.2.2 Fahrzeugsicht	118
5.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen	126
5.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands	126
5.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung	127
5.4 Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände	128
6 Funktion 6: Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen	129
6.1 Beschreibung	132
6.1.1 Use Cases und Szenarien	132
6.1.2 Priorisierung von Use Cases	136
6.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung	136
6.2 Funktionszerlegung	138

6.2.1 Fahrersicht	139
6.2.2 Fahrzeugsicht	144
6.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen	152
6.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands	152
6.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung	154
6.4 Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände	154
Stichwortverzeichnis	156

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 0.1:	Prozess zum kooperativen Verhalten (Franke et. al, 2014)	13
Abbildung 1.1:	Visualisierung eines kooperativen Einfädelvorgangs	18
Abbildung 1.2:	Funktionsbaum für Kooperatives Einfädeln	19
Abbildung 1.3:	Visualisierung mit Hilfe der 3D-Fahrsimulation SILAB	20
Abbildung 1.4:	Big Picture der Funktion F1 „Kooperatives Einfädeln	22
Abbildung 1.5:	Interaktionsdiagramme der einzelnen Phasen der Funktion F1	25
Abbildung 1.6:	Interaktionsdiagramme der Funktion F1 aus Fahrzeugsicht	32
Abbildung 2.1:	Übertragung von Sensordaten an nachfolgendes Fahrzeug	40
Abbildung 2.2:	Kollektive Perzeption ermöglicht Staufolgekolonnen	41
Abbildung 2.3:	Funktionsbaum für Kooperative Längsführung auf Autobahnen	43
Abbildung 2.4:	Big Picture der Funktion F2	48
Abbildung 2.5:	Interaktionsdiagramme der einzelnen Phasen der Funktion F2	51
Abbildung 2.6:	Interaktionsdiagramm auf Fahrzeugsicht	54
Abbildung 2.7:	Situative „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1a)	55
Abbildung 2.8:	Kooperative Anpassung der direkten Regelung/Folgefahrt (Szenario 1b)	56
Abbildung 2.9:	Manöver planen (Teil 1 „Kooperationsanfrage“)	58
Abbildung 2.10:	Manöver planen (Teil 2 „Manöverauswahl“)	60
Abbildung 3.1:	Funktionsbaum der Funktion F3	66
Abbildung 3.2:	Beispielszenario für Use Case 1 (Warnung) und Use Case 2 (Intervention)	67
Abbildung 3.3:	Use Case 1 der Funktion F3: Kooperative Überholwarnung	68
Abbildung 3.4:	Use Case 2 der Funktion F3: Kooperative Kollisionsvermeidung	69
Abbildung 3.5:	Big Picture der Funktion F3 „Kooperatives Überholen auf Landstraßen“	70
Abbildung 3.6:	Interaktionsdiagramm des UC1 „Überholwarnung“	72
Abbildung 3.7:	Interaktionsdiagramm des UC1 „Überholwarnung“	72
Abbildung 3.8:	Interaktionsdiagramm des UC2 „Kollisionsvermeidung“ aus Fahrersicht	73
Abbildung 3.9:	„Deliberative Control Architecture“ - Prozess zum kooperativen Verhalten	74
Abbildung 3.10:	„Deliberative Control Architecture“ - Prozess zum kooperativen Verhalten für Use Case 1 der Funktion F3	75
Abbildung 3.11:	Big Picture Use Case 1 „Kooperative Überholwarnung“ der Funktion F3	76
Abbildung 3.12:	„Deliberative Control Architecture“ - Prozess zum kooperativen Verhalten für Use Case 2 der Funktion F3	78
Abbildung 3.13:	„Deliberative Control Architecture“ - detaillierter Prozessablauf zum kooperativen Verhalten für Use Case 2 der Funktion F3 „Kooperative Kollisionsvermeidung“	78
Abbildung 3.14:	Big Picture Use Case 2 „Kooperative Überholwarnung“ der Funktion F3	80

Abbildung 4.1:	Entscheidungspunkt der Funktion F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“	85
Abbildung 4.2:	Funktionsbaum für die Funktion F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“	86
Abbildung 4.3:	Räumliche Ausdehnung des Manöverabstimmungsbereichs der Funktion F4	87
Abbildung 4.4:	Einbindung der Infrastruktur in das IMAGinE-Modell	88
Abbildung 4.5:	Big Picture der Funktion F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“	89
Abbildung 4.6:	Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht in Phase „Voreinstellung“ der Funktion F4	90
Abbildung 4.7:	Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht in Phase „Routenwahlkriterien“ der Funktion F4	90
Abbildung 4.8:	Interaktionsdiagramm in Phase „Aktivierung“ (Sensierung und Umfeldmodellierung) der Funktion F4	91
Abbildung 4.9:	Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht der Phase „Abstimmung“ (Manöverplanung) der Funktion F4	91
Abbildung 4.10:	Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht der Phase „Manöverdurchführung“ der Funktion F4	92
Abbildung 4.11:	Interaktionsdiagramme der Funktion F4 aus Fahrzeugsicht	100
Abbildung 5.1:	Funktionsbaum für Funktion F5 „Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen“	104
Abbildung 5.2:	Darstellung des Use Case „Abfahrt durch Linksabbiegen“ der Funktion F5	105
Abbildung 5.3:	Auffahrt durch Linkseinbiegen - Vorfahrt Beachten Regelung	106
Abbildung 5.4:	Auffahrt durch Linkseinbiegen – Stopp-Schild Regelung	106
Abbildung 5.5:	Schritte des Ablaufs von Funktion F5	113
Abbildung 5.6:	Big Picture Funktion F5 „Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen“	113
Abbildung 5.7:	Interaktionsdiagramme der Funktion F5 aus Fahrersicht	117
Abbildung 5.8:	Interaktionsdiagramme der Funktion F5 aus Fahrzeugsicht	125
Abbildung 6.1:	Funktionsweise des steigungsabhängigen GPS-Tempomaten	130
Abbildung 6.2:	Überholen durch Lkw auf der Autobahn	133
Abbildung 6.3:	Funktionsbaum für Funktion F6	133
Abbildung 6.4:	Ausschnitt aus Visualisierung zur Funktion F6	135
Abbildung 6.5:	Big Picture Funktion F6	139
Abbildung 6.6:	Interaktionsdiagramm der Funktion F6 aus Fahrersicht	143
Abbildung 6.7:	Interaktionsdiagramme der Funktion F6 aus Fahrzeugsicht	151

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1.1:	Basic Flow in den einzelnen Phasen der Funktion F1 aus Fahrersicht	23
Tabelle 1.2:	Basic Flow in den Phasen 1 und 2 „Sensierung & Umfeldmodellierung“	27
Tabelle 1.3:	Störungen und Alternativen in den Phasen 1 und 2	27
Tabelle 1.4:	Basic Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.1	28
Tabelle 1.5:	Störungen und Alternativen in Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.1 „Kooperationsanfrage“) der Funktion F1	28
Tabelle 1.6:	Basic Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.2 „Manöverauswahl“)	29
Tabelle 1.7:	Störungen und Alternativen für Phase 3 „Manöverplanung“	29
Tabelle 1.8:	Basic Flow in Phase 4 „Manöver durchführen, kontrollieren und abschließen“	30
Tabelle 1.9:	Störungen und Alternativen für Phase 4 „Manöver durchführen, kontrollieren und abschließen“ der Funktion F1	30
Tabelle 2.1:	Detaillierung der Funktion F2	47
Tabelle 2.2:	Basic Flow in den einzelnen Phasen der Funktion F2 aus Fahrersicht	50
Tabelle 2.3:	Basic Flow zur Phase „Sensierung & Umfeldmodellierung“ der Funktion F2	53
Tabelle 2.4:	Störungen und Alternativen für Phase „Sensierung & Umfeldmodellierung“ der Funktion F2	53
Tabelle 2.5:	Basic Flow zur Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1a)	54
Tabelle 2.6:	Störung und Alternativen für Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1a)	54
Tabelle 2.7:	Basic Flow zur Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1b)	55
Tabelle 2.8:	Störung und Alternativen für Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1b)	56
Tabelle 2.9:	Basic Flow zur Phase „Manöverplanung“ (Teil 1 „Kooperationsanfrage“)	57
Tabelle 2.10:	Störungen und Alternativen für Phase „Manöverplanung“	57
Tabelle 2.11:	Basic Flow zur Phase „Manöverplanung“ (Teil 2 „Manöverauswahl“)	59
Tabelle 2.12:	Störungen und Alternativen für Phase „Manöverplanung“	59
Tabelle 3.1:	Detaillierung der Funktion F3	70
Tabelle 3.2:	Ablauf des UC1 „Überholwarnung“ der Funktion F3 aus Fahrersicht	73
Tabelle 3.3:	Ablauf des UC2 „Kollisionsvermeidung“ der Funktion F3 aus Fahrersicht	74
Tabelle 3.4:	Basic Flow der Phasen 1 und 2 des UC1 der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht	75
Tabelle 3.5:	Basic Flow der Phase 3 des UC1 der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht	75
Tabelle 3.6:	Basic Flow der Phase 4 des UC1 der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht	76
Tabelle 3.7:	Ablauf des UC1 „Überholwarnung“ der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht	77
Tabelle 3.8:	Basis Flow in Phase 1 „Sensierung“ und Phase 2 „Umfeldmodellierung“ von UC2 der Funktion F3	79
Tabelle 3.9:	Basis Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ von UC2 der Funktion F3	79
Tabelle 3.10:	Basis Flow in Phase 4 „Manöverdurchführung“ von UC2 der Funktion F3	79
Tabelle 3.11:	Ablauf des UC2 „Kollisionsvermeidung“ der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht	80

Tabelle 4.1:	Basic Flow in Phase 1 der Funktion F4	93
Tabelle 4.2:	Störungen und Alternativen in Phase 1 der Funktion F4	93
Tabelle 4.3:	Basic Flow in Phase 2 der Funktion F4	93
Tabelle 4.4:	Störungen und Handlungsalternativen in Phase 2 der Funktion F4	93
Tabelle 4.5:	Basic Flow in Phase 3 der Funktion F4	94
Tabelle 4.6:	Störungen und Alternativen in Phase 3 der Funktion F4	95
Tabelle 4.7:	Basic Flow in Phase 4 der Funktion F4	95
Tabelle 4.8:	Störungen und Alternativen in Phase 4 der Funktion F4	95
Tabelle 4.9:	Basic Flow in Phase 5 der Funktion F4	96
Tabelle 4.10:	Störungen und Alternativen in Phase 5 der Funktion F4	97
Tabelle 4.11:	Basic Flow in Phase 6 der Funktion F4	97
Tabelle 5.1:	Detaillierung der Funktion F5	107
Tabelle 5.2:	Basic Flow der Funktion F5 aus Fahrersicht	115
Tabelle 5.3:	Basic Flow in Phase 1 „Situation erkennen“ der Funktion F5	118
Tabelle 5.4:	Störungen und Handlungsalternativen in Phase 1 „Situation erkennen“ der Funktion F5	119
Tabelle 5.5:	Basic Flow in Phase 2 „Kooperationspartner ermitteln“ der Funktion F5	120
Tabelle 5.6:	Störungen und Alternativen in Phase 2 „Kooperationspartner ermitteln“ der Funktion F5	120
Tabelle 5.7:	Basic Flow in Schritt 3 „Manöverabstimmung“ der Funktion F5	121
Tabelle 5.8:	Störungen und Alternativen in Schritt 3 „Manöverabstimmung“ der Funktion F5	122
Tabelle 5.9:	Basic Flow in Schritt 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F5	123
Tabelle 5.10:	Störungen und Alternativen in Schritt 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F5	123
Tabelle 6.1:	Anforderungen und Risiko aus Fahrersicht an das Lkw-Überholmanöver	131
Tabelle 6.2:	Detaillierung der Funktion F6	137
Tabelle 6.3:	Interaktionen aus Fahrersicht in Phasen 1 und 2 der Funktion F6	140
Tabelle 6.4:	Interaktionen aus Fahrersicht in Phase 3 „Manöverplanung“ der Funktion F6	140
Tabelle 6.5:	Interaktionen aus Fahrersicht bei Manöverdurchführung der Funktion F6	141
Tabelle 6.6:	Interaktionen aus Fahrersicht beim Manöverabschluss der Funktion F6	141
Tabelle 6.7:	Basic Flow zu den Phasen 1 und 2 „Sensierung“ und „Umfeldmodellierung“	145
Tabelle 6.8:	Störungen und Alternativen in den Phasen 1 und 2	146
Tabelle 6.9:	Basic Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ der Funktion F6	147
Tabelle 6.10:	Störungen und Alternativen in Phase 3 „Manöverplanung“ der Funktion F6	148
Tabelle 6.11:	Basic Flow in Phase 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F6	149
Tabelle 6.12:	Alternativen und Störungen für Phase 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F6	149

Tabelle 6.13:	Basic Flow zum Use Case „Verkehrsinformationen liefern“	151
Tabelle 6.14:	Basic Flow zum Use Case „Fahrzustandsdaten übermitteln“	151

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

CAM	Cooperative Awareness Message
CAN	Controller Area Network
DENM	Decentralised Notification Message
EPM	Environmental Perception Message
HUD	Head-up Display
IKS	IMAGinE Kooperationsstufe
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
TSR	Time to a safely return
TTC	Time to collision
TTI	Time to intersection
UC	Use Case
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-X

EINLEITUNG

Im Vorhaben IMAGinE wird ein Konzept der kooperativen Manöverplanung erarbeitet und konkret anhand ausgewählter kooperativer Funktionen umgesetzt. Mit der Vorhabenbeschreibung wurden sechs kooperative Funktionen definiert.

Um die für die Erprobung im Realfahrzeug und Nachbildung in Simulation notwendige Systemspezifikation zu erarbeiten, bedarf es der Herausarbeitung der konkreten Anforderungen aus Fahrersicht an kooperative Manöver und MMI für jede dieser sechs Funktionen.

Um die Funktionen mit einem weitgehend gleichen Detailgrad zu beschreiben, wurde eine einheitliche Vorgehensweise gewählt, die im Folgenden kurz erläutert wird. Diese schlägt sich auch in einer – über alle sechs Funktionen hinweg – einheitlichen Gliederungsstruktur und einheitlichen Darstellung von verschiedenen Sachverhalten (z.B. Funktionsbäume oder Interaktionsdiagramme) nieder.

Diese Vereinheitlichung der Ergebnisdokumentation schafft auch eine Voraussetzung dafür, dass sich die formulierten Anforderungen später gut aggregieren lassen (siehe Deliverable D1.3).

Zunächst werden die Funktionen in ihrer Funktionsweise näher beschrieben. Es wird aufgezeigt und erläutert, worin der Mehrwert der angestrebten Funktionsausprägung gegenüber bereits nicht-kooperativen Szenarien bzw. bestehenden Lösungen liegt.

Auch wird aufgezeigt, welche Use Cases und Szenarien sich unterscheiden lassen („Funktionsbaum“). Diese wurden in Teilen gegenüber der Darstellung in der Vorhabenbeschreibung weiterentwickelt. Die für die Umsetzung im Fahrzeug bzw. in der Simulation priorisierten Use Cases und Szenarien werden benannt und die Argumentation für deren Auswahl erläutert.

Für diese priorisierten Use Cases und Szenarien werden dann die Manöverabläufe näher beschrieben. Hierzu werden zunächst alle am Manöver Beteiligten („Big Picture“) dargestellt. Bei der Interaktion zwischen den am Manöver Beteiligten lassen sich – in Anlehnung an die Deliberate Control Architecture¹ – inhaltlich vier Phasen unterscheiden. Mit Blick auf die für die Durchführung einer kompletten Manöverplanung notwendigen Teilschritte lässt sich dieses Modell aus IMAGinE-Sicht – wie in Abbildung 0.1 dargestellt – weiterentwickeln:

¹ Franke, K.; Düring, M.; Balaghiasefi, R. (2014). A Reference Architecture for CISS/CDAS within the Field of Cooperative Driving. 3rd International Conference on Connected Vehicles and Expo 2014 IEEE.

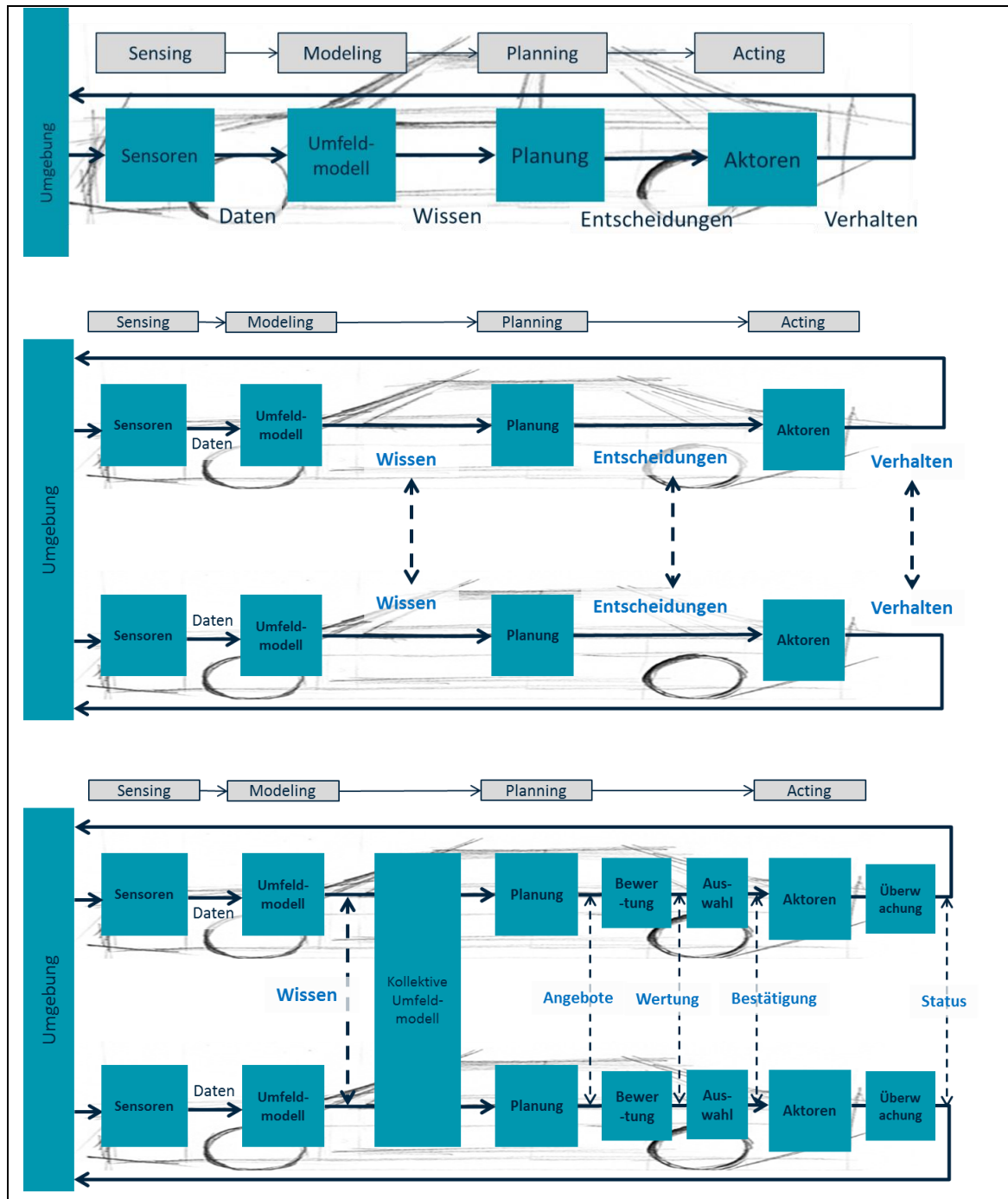


Abbildung 0.1: Prozess zum kooperativen Verhalten (Franke et. al, 2014)

Dementsprechend gliedert sich die zu beschreibende Interaktion je ausgewähltem Use Case in folgende Schritte:

- Sensierung (Sensing)
- Umfeldmodellierung (Modeling)
- Manöverplanung (Planning)
- Manöverdurchführung und -kontrolle (Acting)

In Teilen lässt sich diese Reinform nicht 1:1 umsetzen. Für die Funktion F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“ bedarf es einer Erweiterung dieses Modells, um die Interaktion mit der Infrastruktur konkret darstellen zu können (siehe Abbildung 4.4).

Je Use Case werden die Interaktionen dann aus *Fahrersicht* beschrieben – sowohl in tabellarischer Form als auch in Form von Ablaufdiagrammen.

Darüber hinaus werden auch die Interaktionen aus *Fahrzeugsicht* beschrieben. Dies geht eigentlich über die TP1-Perspektive (Fahrersicht) hinaus. Diese Betrachtung ist dennoch wichtig, um funktionsübergreifend z.B. Anforderungen an Nachrichteninhalte erarbeiten zu können (siehe Deliverable D1.3). Bei der Darstellung der Interaktionen aus Fahrzeugsicht wird – je Manöverphase – zwischen einem störungsfreien Ablauf „Basic Flow“ und einem störungsbehafteten Ablauf unterschieden. Da im letztgenannten Fall das System auf die Abweichungen situationsspezifisch reagieren muss, entsteht der „Alternative Flow“.

Der Funktionszerlegung schließt sich eine Zusammenfassung des einschlägigen Literaturstandes zu den vorgesehenen Funktionen und Use Cases an. Hieraus lassen sich Erkenntnisse z.B. zur Identifikation bisher bekannter Faktoren, welche die Interaktion zwischen Fahrern (ohne jegliche technische Unterstützung) beeinflussen, Ergebnisse empirischer Arbeiten, die sich mit zeitlichen Parametern der Fahrzeuginteraktion beschäftigen (z.B. Zeitlücken-Verteilungen aus Verkehrsbeobachtungen oder NDS-Daten) und Untersuchungsergebnisse zu bestehenden Informations- bzw. Assistenzlösungen gewinnen. Abschließend werden literaturbasierte Handlungsempfehlungen zur Ausgestaltung des MMI formuliert.

Im Rahmen der Use Case-Analyse wurden durch die Projektpartner teilweise eine Reihe von Fragestellungen identifiziert, die über die Perspektive, die TP1 einnimmt, hinausgehen, die aber für die weitere inhaltliche Ausplanung der folgenden Teilprojekte TP2, TP3, TP4 bzw. TP5 relevant sein könnten. Da diese einerseits helfen, den Fokus der Use Case-Analyse auf die relevanten Anwendungsfälle zu legen, und andererseits die Auslegung einer Use Case übergreifenden, generischen Systemarchitektur beeinflussen könnten, werden sie bereits hier in einem jeweiligen Unterkapitel „Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände“ vermerkt.

1 FUNKTION 1: KOOPERATIVES EINFÄDELN AN ANSCHLUSS-STELLEN

Der kooperative Einfädelassistent unterstützt den Fahrer bei Ein- und Ausfädelvorgängen auf Autobahnen und Schnellstraßen. Die Anwendbarkeit der Funktion ist lokal beschränkt auf Bereiche, in denen Fahrspuren enden oder sich verflechten. In diesen Bereichen müssen Fahrer unter räumlicher und zeitlicher Beschränkung Fahrstreifenwechsel durchführen. Die dafür notwendigen Fahrmanöver fordern Fahrer in großem Maße heraus, da:

- die Einfädelsituation dem Fahrer eine hohe Aufmerksamkeit abfordert,
- es beim Einfädeln oft zu Missverständnissen kommt und damit zu unsicheren bzw. unkomfortablen Situationen und
- der Fahrer beim Einfädeln nur eine begrenzte Zeit zur Entscheidungsfindung hat.

Im Fokus der Funktion sind spezifische Anschlussstellen von Autobahnen und Schnellstraßen:

- Auffahrten, in denen typischerweise die Auffahrtspur räumlich begrenzt ist und endet,
- Fahrstreifensubtraktionen, in denen Fahrstreifen aufgrund von Baustellen oder dem Ende einer Ausbaustrecke enden,
- Verflechtungsbereiche, in denen Fahrzeuge zwischen Hauptstrecken wechseln.

Hinzu können in diesen Bereichen erschwerende Faktoren wie hohe Verkehrsdichte, einzelne langsam fahrende Fahrzeuge oder Einschränkungen des Sichtbereichs durch Lkw hinzukommen.

In den oben genannten Situationen suchen Fahrer Lücken im fließenden Verkehr, um auf einen neuen Fahrstreifen einzufädeln. Der Fahrer muss hierbei verschiedene Aufgaben gleichzeitig lösen:

- Suchen von geeigneten Lücken hinsichtlich Größe und Erreichbarkeit und das Treffen einer Auswahl
- Deutlichmachung der Spurwechselabsicht gegenüber den unmittelbar involvierten Fahrzeugen und Erkennung einer Kooperationsabsicht
- Prognose der dynamischen Entwicklung der Lücke (Geschwindigkeiten der begrenzenden Fahrzeuge, unter Einbeziehung von mehr oder weniger deutlich erkennbaren Absichten der jeweiligen Fahrer hinsichtlich Kooperation)
- Situationsgerechte Längs- und Querregelung des Fahrzeugs ohne Behinderung der unmittelbar involvierten Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn und unter Beachtung eines näher rückenden Spurendes

1.1 Beschreibung

1.1.1 Use Cases und Szenarien

Aufgrund der beschriebenen Komplexität der Fahraufgabe sind Anschlussstellen zentrale Unfallschwerpunkte. Eine Unterstützung durch eine Assistenz oder Teilautomatisierung soll den Fahrer bei den oben genannten Teilaufgaben entlasten. Insbesondere bieten hierbei innovative, kooperative V2X-Ansätze als Basis für derartige Funktionen großes Potenzial. Beispielsweise erhöhen die Funktionen die Reichweite der bordeigenen Umfeldsensorik und verlängern damit für das einfädelnde Fahrzeug die Zeitspanne zur Entscheidungsfindung oder ggf. Abstimmung mit Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn. Diese Vorteile werden des Weiteren sehr deutlich, wenn man die Beschränkungen von klassischen V2X-Systemen ohne Kooperation mit den IMAGinE-Kooperationsstufen² 0 bis 5 in den o.g. Nutzenfällen vergleicht.

Systeme mit IMAGinE Kooperationsstufe 1 (IKS 1)

Hier kann kein Informationsaustausch über Funk erfolgen. Es kann jedoch angestrebt werden, Manöver auch beim teil- oder hochautomatisierten Fahren über konventionelle Mittel (Blinker, Lichthupe, Bahnführung) so abzustimmen, wie das ein menschlicher Fahrer ohne Funkverbindung auch macht.

Systeme mit IMAGinE Kooperationsstufe 2 (IKS 2)

Die mit klassischer V2X-Technologie ausgestatteten Fahrzeuge tauschen im Wesentlichen nur ihre Positions- und Bewegungsdaten aus. Es gibt keinen Rückkanal und daher auch keine Antwort auf eine gesendete Information. Liegt die Ausstattungsrate unter 100% (auch in der Zukunft eine realistische Annahme), ist damit bestenfalls eine Warnung vor zu kleinen Lücken ohne jede Zuverlässigkeit möglich. Eine zuverlässige Warnung ist unmöglich, da sich in jeder so bestimmten Lücke nicht mit V2X-Technologie ausgestattete Fahrzeuge befinden können. Darüber hinaus erfolgt die Erkennung der Kooperationsbereitschaft der Fahrer auf der Hauptfahrbahn weiterhin ausschließlich durch den einfädelnden Fahrer und damit ohne Funktionsunterstützung.

Systeme mit IMAGinE Kooperationsstufe 3 (IKS 3)

Zusätzlich zur Kooperationsstufe 2 werden aus der bordeigenen Sensorik der mit V2X-Technologie ausgestatteten Fahrzeuge ausgewählte Daten übertragen. Es sollen sowohl einzelne relevante Kenndaten (z.B. Entfernung zum nächsten relevanten Vorauszfahrzeug) als auch ein umfangreicheres Fahrumgebungsmodell (optionale kollektive Perzeption) genutzt werden können. Damit können nicht ausgestattete Fahrzeuge, die vor einem ausgestatteten Fahrzeug fahren, zuverlässig erkannt werden. Eine zuverlässige Warnung vor zu kleinen Lücken wird möglich. Eine Ausstattungsquote von weit unter der Vollausstattung genügt, um einen messbaren Funktionsnutzen zu erzeugen. Problematisch bleibt jedoch, dass die Ermittlung der Kooperationsabsicht

² Eine ausführliche Beschreibung der IMAGinE-Kooperationsstufen findet sich in Deliverable D1.1, Kapitel 1.4.

technisch nicht unterstützt wird. Damit sind weiterhin Fehler in der Erkennung der Kooperationsabsicht und damit Fahrfehler möglich.

Systeme mit IMAGinE Kooperationsstufen 4 und 5 (IKS 4 und IKS 5)

Zusätzlich übertragen hier alle mit V2X-Technologie ausgestatteten Fahrzeuge ihre Kooperationsanfragen und ggf. Kooperationsabsichten. Die Absicht eine Lücke zu öffnen kann damit dem einfädelnden Fahrzeug frühzeitig mitgeteilt werden. Über die Art der Abstimmung zur kollektiven Manöverplanung kann nun noch zwischen der Stufe 4 und 5 unterschieden werden. In Stufe 4 realisiert einer der Kooperationspartner die Manöverplanung für beide (alle) kooperierenden Fahrzeuge und sendet eine Anfrage mit Manöर्वorschlag an alle Kooperationspartner. Diese können dem vorgeschlagenen Manöver zustimmen oder es ablehnen. In einer Stufe 5 wird eine verteilte Manöverplanung und -abstimmung realisiert. Jedes Fahrzeug plant für sich, es findet eine Abstimmung auf Basis dieser verteilten Berechnungsergebnisse statt.

Darauf aufbauend wird z.B. eine Teilautomatisierung des Auffahrvorgangs möglich. Missverständnisse und damit gefährliche Situationen können vermieden werden.

In Abbildung 1.1 wird ein kooperativer Einfädelvorgang visualisiert. Im dargestellten Fall erkennt ein mit kooperativer V2X-Technologie ausgestattetes Fahrzeug (hier weiß) per klassischer bordautonomer Sensorik (z.B. Radar) vorausfahrende Fahrzeuge (hier blau, ggf. nicht mit V2X ausgestattet). Die vermessene Lücke hinter dem blauen Fahrzeug kann per V2X Kommunikation an ein mit kooperativer V2X-Technologie ausgestattetes Fahrzeug auf der endenden Auffahrs pur übermittelt werden. Auf dieser Basis übermitteln alle ausgestatteten Fahrzeuge vermessene Lücken und gegebenenfalls Kooperationsabsichten. Bei erfolgreicher Abstimmung kann das weiße Fahrzeug gezielt die Lücke zum Vordermann vergrößern und das Einfädeln erleichtern.

Durch die Übertragung von Messdaten zur Lückenvermessung wird es möglich, auch bei einer V2X-Ausstattungsquote von weit unter 100% einen deutlichen Funktionsnutzen zu erzielen. Der per V2X unterstützte Austausch von Absichten der im Einfädelvorgang direkt involvierten Fahrzeuge vermeidet Missverständnisse in der Interpretation der Kooperationsabsichten und kann so kritischen Situationen vorbeugen.

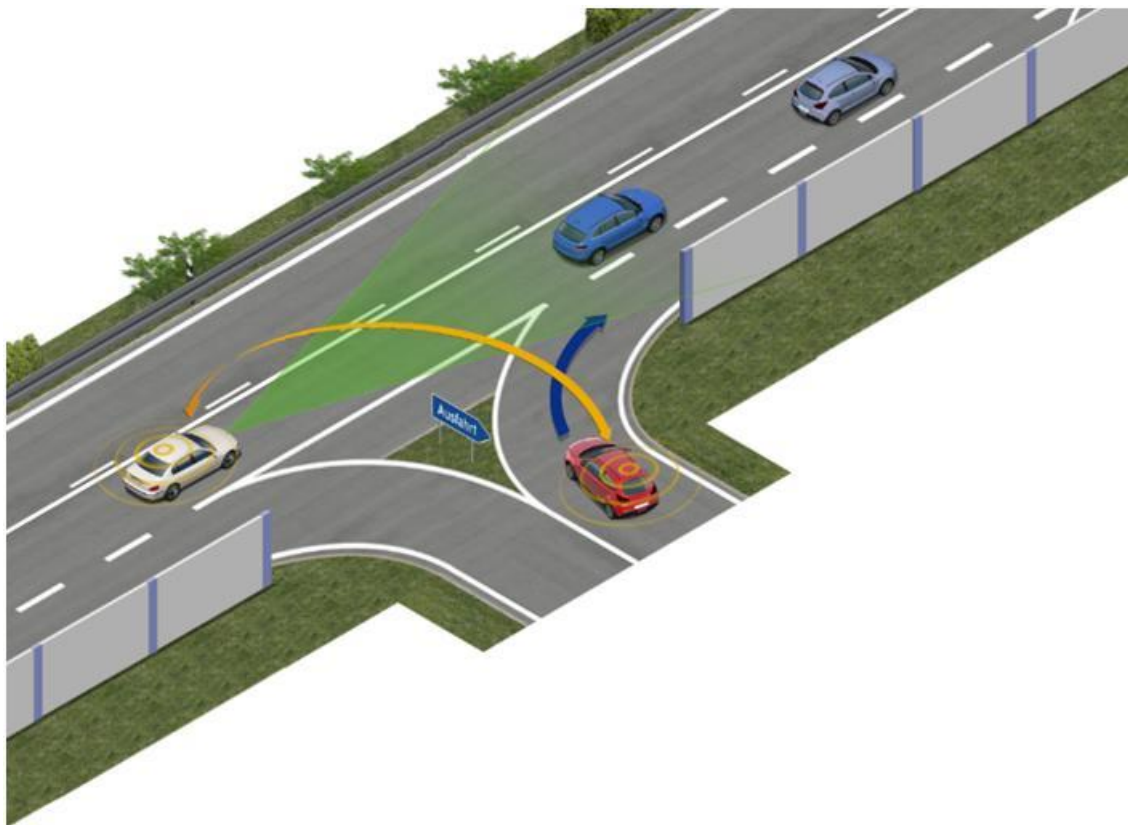


Abbildung 1.1: Visualisierung eines kooperativen Einfädelvorgangs

(Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

Abbildung 1.2 zeigt einen Funktionsbaum mit den zugehörigen Use Cases und Szenarien. Anhand der genannten drei Use Cases (Auffahrt, Fahrstreifensubtraktion, Verflechtungsbereich) wird der Fokus der Funktion auf eine Unterstützung von durch die Straßentopologie erzwungenen Spurwechseln deutlich. Damit liegt eine klare räumliche Begrenzung der Anwendbarkeit der Funktion vor. Des Weiteren wurden in allen Use Cases jeweils Szenarien mit wenig und mit dichtem Verkehr unterschieden.

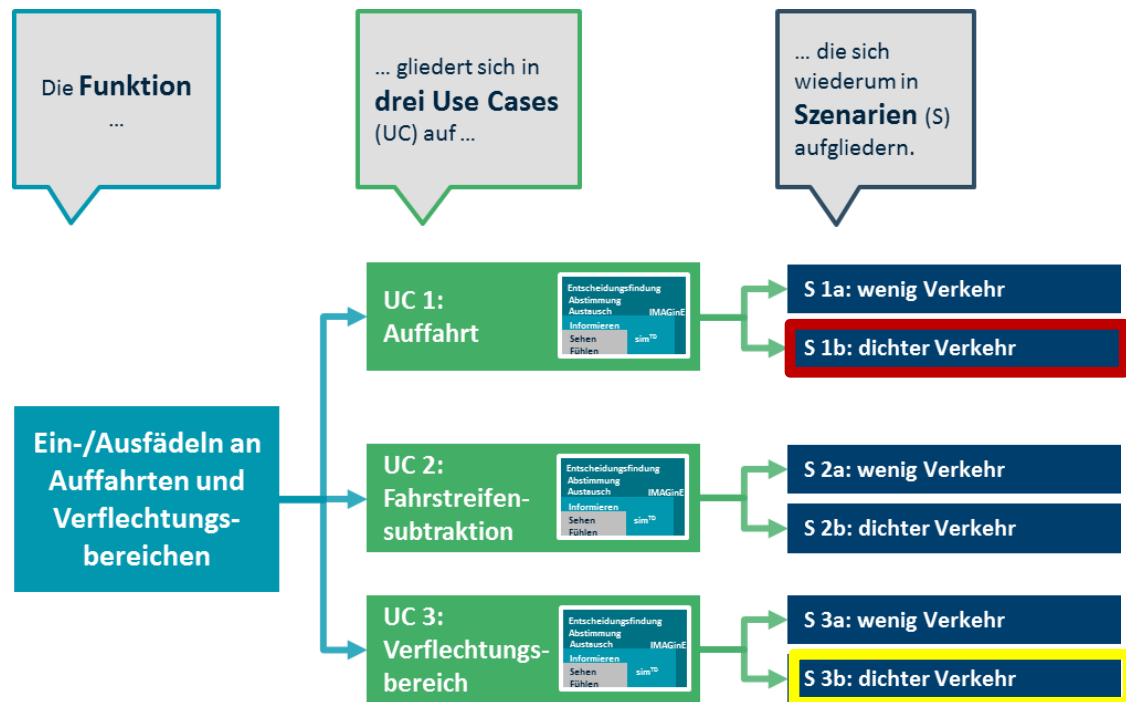


Abbildung 1.2: Funktionsbaum für Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen
(rot: Prio 1 Nutzenfall, gelb: Prio 2 Nutzenfall)

Die Entwicklung eines gemeinsamen partnerübergreifenden Verständnisses über den makroskopischen Bewegungsablauf (verfügbare Zeiträume, typische Fahrzeugabstände, gefahrene Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) beim Einfädeln an einer Autobahnauffahrt wurde durch die Umsetzung von Visualisierungen unterstützt. Abbildung 1.3 zeigt einen Ausschnitt aus dieser Visualisierung. Ein graues einfädelndes Fahrzeug kooperiert mit einem schwarzen Fahrzeug. Letzteres öffnet eine Lücke im dichten Verkehr durch einen sanften Bremsengriff. Je nach Funktionsauslegung und Reichweite der Kommunikation kann ein solcher Eingriff auch so früh erfolgen, dass das Schleppmoment (Gas wegnehmen) ausreicht, um eine Lücke zu öffnen. Wird eine Teilautomatisierung verwendet, müssen die kooperativen Eingriffe in jedem Fall so ausgelegt werden, dass es zu keiner Behinderung oder Beeinflussung des Fahrflusses auf der Hauptfahrbahn kommt.



Abbildung 1.3: Visualisierung mit Hilfe der 3D-Fahrsimulation SILAB
(Umsetzung durch das WIVW)

1.1.2 Priorisierung von Use Cases

Im weiteren Projektverlauf (Anforderungsanalyse, Umsetzung) liegt der Fokus der Funktion 1 auf dem Use Case 1 „Auffahrt“ bei dichtem Verkehr in der Ausprägung IKS 4 (optional 5) (Priorität 1).³ Ein Automatisierungsgrad wird nicht vorgegeben. Dieser Nutzenfall inkludiert die meisten anderen Fälle. Weiterhin soll der Fokus auf dem Use Case 3 „Verflechtungsbereich“ liegen. Dieser ist in Bezug auf die Situationsanalyse sowie die Anzahl und den Umfang der notwendigen V2X-Interaktion komplexer als Use Case 1. Alle weiteren Aspekte (Trajektorienplanung, Regelung) stellen keine höheren Anforderungen als im Use Case 1. Daher soll dieser Use Case mit Priorität 2 und einem Fokus auf die Anforderungsanalyse (insbesondere für erforderliche Nachrichtenformate und die Ausgestaltung der Situationsanalyse) und ggf. Simulation bearbeitet werden.

1.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung

Um das praktische Verständnis der Use Cases zu erhöhen, wird im Folgenden anhand einiger Modellannahmen der räumliche und zeitliche Ablauf eines Auffahrmanövers näher beschrieben. Zunächst werden folgende Annahmen festgelegt, die den Ausgangszustand der Auffahrsituation beschreiben:

- Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn fahren mit 33 m/s (120 km/h) auf der rechten Spur.
- Als V2X-Technologie wird ITS-G5 verwendet, dessen Reichweite im Szenario mit 400 m angenommen wird.
- Der Einfädler wird hier als stehend / sehr langsam angenommen. Diese Annahme hat einen konservativen Einfluss auf die Ergebnisse aus den nachfolgenden Berechnungen, da sich der

³ Da im Rahmen der Entwicklung die Komplexität des Gesamtsystems langsam erhöht wird, werden die IKS 0 bis IKS 3 trotzdem als Zwischenstufen realisiert werden.

Zeitraum für die Fahrzeug-Kooperation durch Beschleunigen des Einfädlers (EGO) auf der Auffahrt real verlängert. Es handelt sich also um eine Worst case-Abschätzung.

Auf Basis dieser Annahmen können nun folgende Berechnungen durchgeführt werden, die den räumlichen und zeitlichen Ablauf des Manövers näher beschreiben:

- Der Zeitraum für die Kooperation beträgt ca. 10 s. Aus der reinen Annäherungszeit der Fahrzeuge von 12 s wurden zusätzlich 2 s abgezogen, um die potenzielle Abstimmung und einen notwendigen Sicherheitsabstand abzubilden.
- Wenn das Fahrzeug auf der Hauptfahrbahn kooperiert und eine Lücke zum Einfädeln öffnet, wird das durch einen möglichst sanften Eingriff erfolgen (Gas wegnehmen). In der Folge wird am kooperierenden Fahrzeug ein Schleppmoment anliegen. Kombiniert mit der Reibung und dem Luftwiderstand entsteht eine sanfte Beschleunigung von -0.5 m/s^2 .⁴
- Bei 10 s Annäherungszeit können damit 5 m/s abgebaut werden.
- In 10 s entspricht das einer Lückenvergrößerung von $10 \text{ s} * 0.5 * 5 \text{ m/s} = 25 \text{ m}$. Damit muss die gesetzlich vorgeschriebene oder funktionsseitig gewünschte Gesamt-Lückengröße erreicht werden, sonst ist Lücke nicht nutzbar und eine Kooperation wäre nicht zielführend / sinnvoll.
- Unter der Annahme, dass die Abstimmung und die Entscheidung innerhalb von 2 s erfolgen, bleiben wie aufgezeigt 10 s für die Beschleunigung des EGO-Fahrzeugs und das Auffahrmanöver. Es ist jedoch zu beachten, dass sich durch die Beschleunigung des EGO-Fahrzeugs die Geschwindigkeiten von EGO und Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn (HF) annähern. Damit verlängert sich diese Zeit beliebig und wird nur durch die Länge der Auffahrspur beschränkt.

1.2 Funktionszerlegung

Wie ein systemgestütztes Einfädelmanöver aus Nutzersicht ablaufen könnte, zeigt Abbildung 1.4. Dargestellt sind alle am Manöver beteiligten Akteure und deren Rollen. Neben dem Einfädler (EGO) und den benachbarten Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn sind auch noch die Verkehrsinfrastruktur sowie der umgebende Verkehr beteiligt. Das Manöver selbst kann in vier Phasen unterteilt werden: (1) Sensierung, (2) Umfeldmodellierung, (3) Manöverplanung, (4) Manöverdurchführung und -kontrolle. In den ersten drei Phasen können Verkehrsdaten sowie Empfehlungen seitens der Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt werden. Der nicht direkt benachbarte Verkehr beeinflusst die Phase 1 und muss auf die Phase 4 reagieren.

⁴ Die Annahme entspricht erneut einer Worst case-Abschätzung. Denkbar wäre z.B. dass $\pm 2 \text{ m/s}^2$ für die meisten Fahrer noch akzeptabel sind. In diesem Fall steigt die zu erreichende Lückenvergrößerung deutlich. Im Rahmen der MMI-Auslegung wird im weiteren Projektverlauf auch bestimmt, welche Beschleunigungen eines kooperativen Eingriffs vom Fahrer akzeptiert werden.

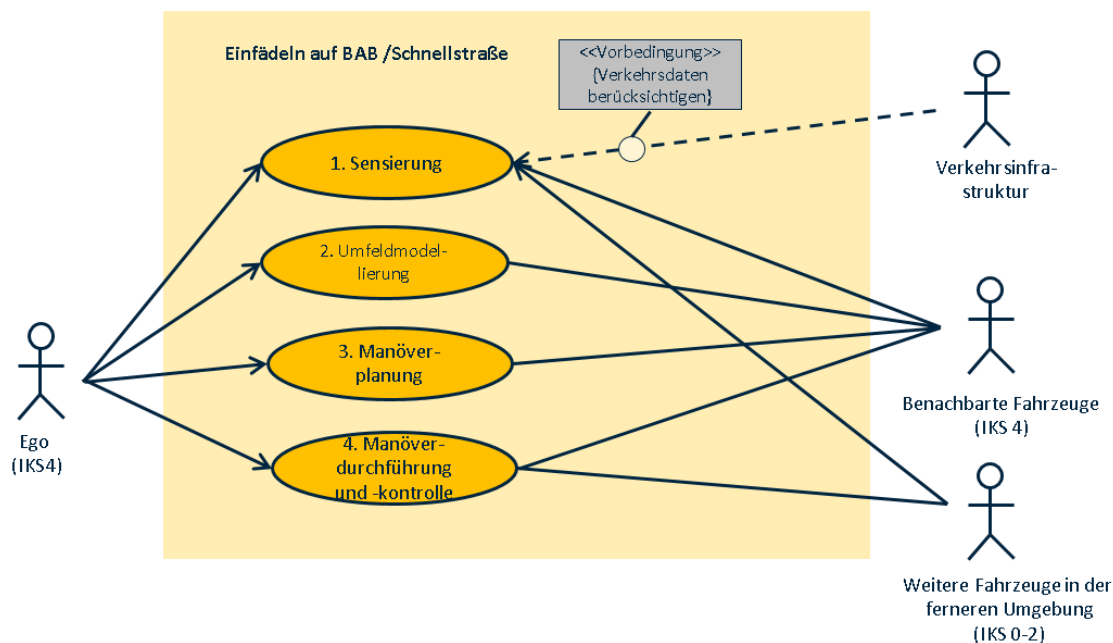


Abbildung 1.4: Big Picture der Funktion F1 „Kooperatives Einfädeln an Anschlussstellen“

Da die ersten beiden Phasen eng verbunden sind (Phase 1 stellt alle Daten für Phase 2 zur Verfügung) und damit die Input-Datenflüsse für die ersten beiden Phasen identisch sind, werden diese aus praktischen Erwägungen in der Folge zusammen in einem Ablaufdiagramm betrachtet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird Phase 3 in die Teilphasen (3.1) Kooperationsanfrage und (3.2) Manöorauswahl unterteilt.

1.2.1 Fahrersicht

Aus Perspektive des Fahrers lassen sich die einzelnen Phasen genauer spezifizieren. Hierbei wird ein störungsfreier Ablauf aus Sicht des Einfädlers sowie aus Sicht benachbarter Fahrer betrachtet. Die Betrachtung erfolgt für die manuelle Fahrt und die IMAGinE-Kooperationsstufe 4 (IKS 4).

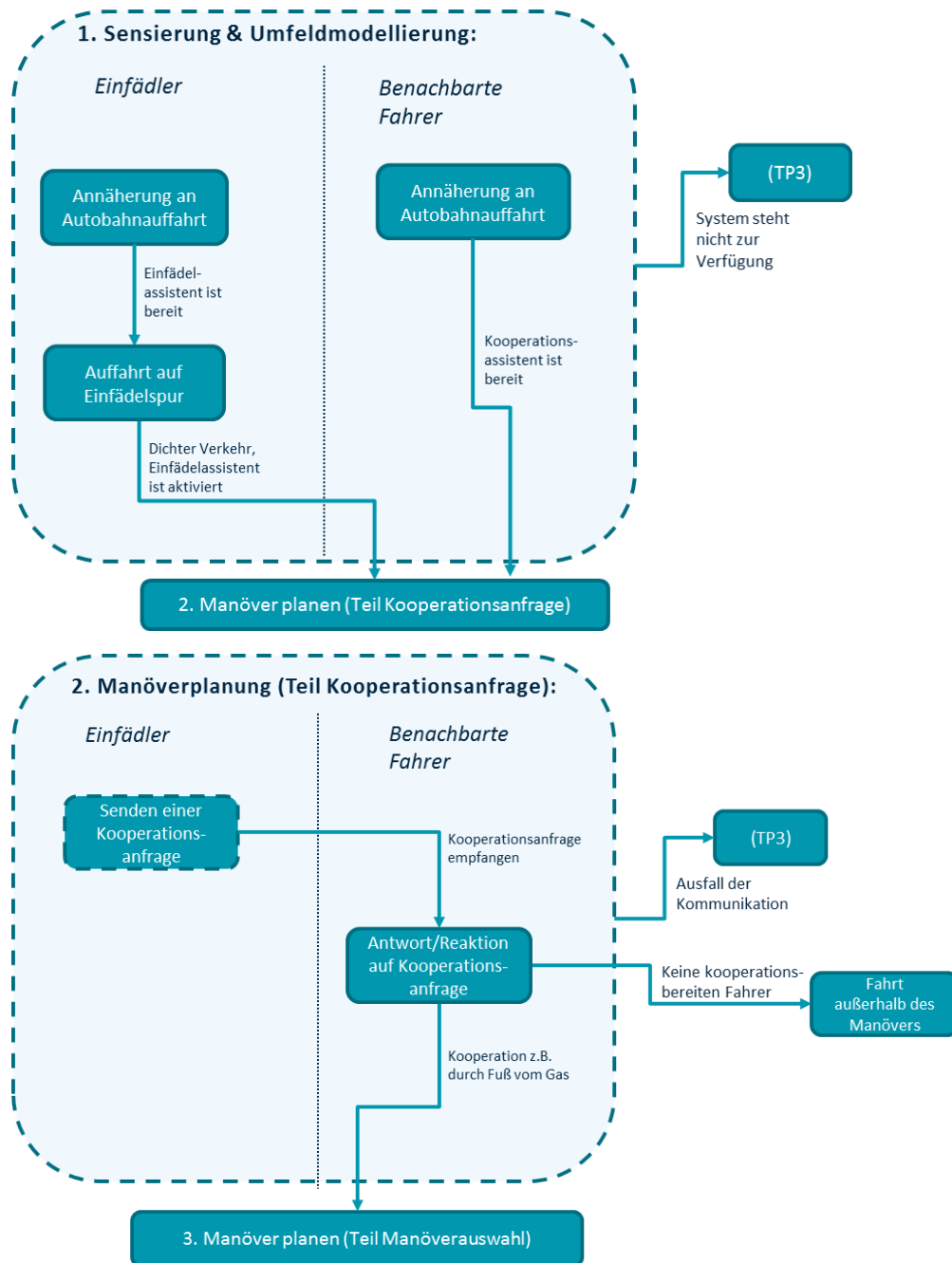
Sensierung & Umfeldmodellierung	Basic Flow - Einfädler	Basic Flow - Benachbarte Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	System ist bereit („Einfädelassistent bereit“). Falls dichter Verkehr, informiert das System des Einfädlers vor der Einfädelsituation den Fahrer („Einfädelassistent aktiviert“).	System ist bereit („Kooperationsassistent bereit“).
Abbruchvarianten	- System steht nicht zur Verfügung (div. Gründe) - Systemabbruch	

Manöver- planung	Basic Flow - Einfädler	Basic Flow - Benachbarte Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	Das Fahrzeug schickt automatisch eine Kooperationsanfrage an Fzge auf der Hauptfahrbahn. Fahrer wird weiterhin informiert, dass System aktiv ist („ <i>Einfädelassistent aktiviert</i> “).	Der Fahrer auf der Hauptfahrbahn wird über die Kooperationsanfrage des Einfädlers informiert („ <i>Kooperationsanfrage von Einfädler empfangen</i> “). Es wird abgefragt, ob Fahrer kooperieren will („ <i>Kooperieren durch Fuß vom Gas?</i> “). Ergebnis wird an Einfädler geschickt.
Abbruch- varianten	- Systemabbruch - Keine Lücke bzw. kein kooperativer Partner auf Hauptfahrbahn	

Manöver- planung	Basic Flow - Einfädler	Basic Flow - Benachbarte Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	Das System informiert den Fahrer über den Kooperationsstatus („ <i>Kooperationspartner gefunden</i> “). Daraufhin erfolgt die Manöverabstimmung der Systeme.	Es erfolgt die Manöverabstimmung der Systeme.
Abbruch- varianten	- Systemabbruch - Fahrer übersteuert. - Kooperativer Partner übersteuert. - Dritte „stören“.	

Durchführung/ Abschluss	Basic Flow - Einfädler	Basic Flow – Benachbarte Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	System informiert den Fahrer, dass eine Lücke erstellt wird („ <i>Lücke wird vorbereitet</i> “) bzw. erstellt ist („ <i>Lücke erstellt</i> “) und ein Einfädeln möglich ist. Der Fahrer fädelt ein. System schaltet sich aus.	Kooperationsmanöver findet weiterhin statt, indem eine Lücke erstellt wird („ <i>Aktive Kooperation – Fuß vom Gas</i> “). System meldet erfolgreiche Kooperation („ <i>Kooperation erfolgreich. Danke!</i> “). System schaltet sich aus.
Abbruch- varianten	Systemabbruch	

Tabelle 1.1: Basic Flow in den einzelnen Phasen der Funktion F1 aus Fahrersicht



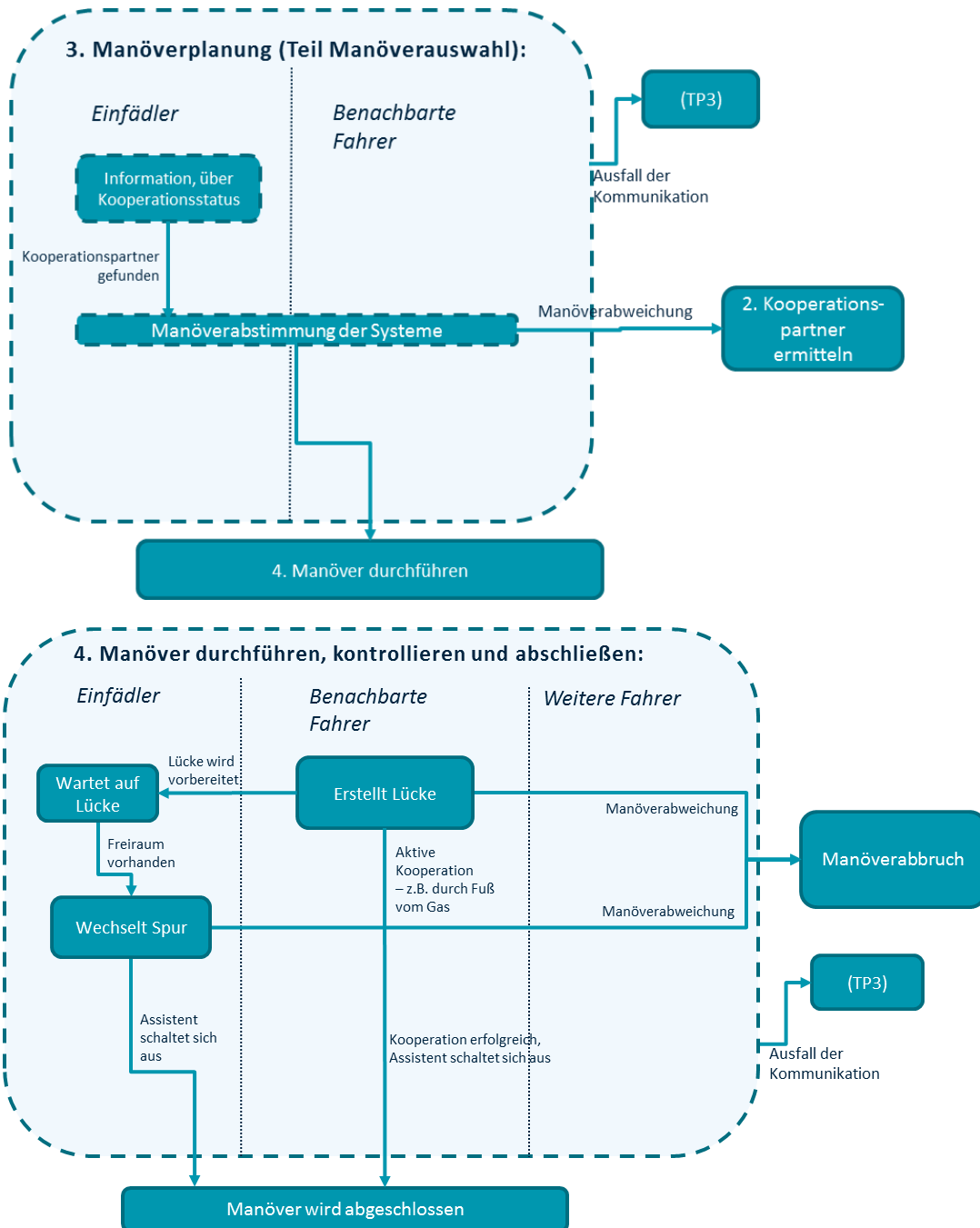


Abbildung 1.5: Interaktionsdiagramme der einzelnen Phasen der Funktion F1 aus Fahrersicht

Aus den Tabellen und Diagrammen aus Fahrersicht ergeben sich die folgenden exemplarischen Fragen zur MMI-Gestaltung (keine vollständige Liste):

- Wie muss die Informationsanfrage gestaltet sein, damit der Fahrer sie (1) versteht und auch (2) zur Kooperation motiviert wird?
- Ist eine implizite Bestätigung einer Kooperationsanfrage (z.B. Fuß vom Gas) ausreichend oder muss der Fahrer diese explizit bestätigen (z.B. Button)?
- Sollte für die Lückenerstellung eine Handlungsanweisung oder ein Handlungsziel gegeben werden? Welche Modalität ist hierfür geeignet?
- Ist am Ende des Manövers eine Meldung (z.B. „Kooperation erfolgreich“) für die Zufriedenheit wichtig?

1.2.2 Fahrzeugsicht

Nachfolgend werden die vier genannten Phasen aus Fahrzeugsicht näher aufgeschlüsselt. Hierbei wird zwischen einem störungsfreien Ablauf „Basic Flow“ und einem störungsbehafteten Ablauf unterschieden. Da im letztgenannten Fall das System auf die Abweichungen situationsspezifisch reagieren muss, entsteht der „Alternative Flow“.

Für die Betrachtung der Interaktionen wurde die IMAGinE Kooperationsstufe 4 (IKS 4) angenommen, d.h. Austausch von CAM/DENM, Sensordaten, Vorschlag eines Manöverplans durch eine Seite, Zustimmung / Ablehnung des Manöverplans durch die andere Seite. Wird auf die gemeinsame Abstimmung des Fahrverhaltens / den Austausch eines Manöverplans verzichtet (entspricht IKS 3), vereinfachen sich die nachfolgenden Darstellungen etwas, bleiben aber im Grundsatz dennoch gültig.

In den folgenden Tabellen zum Basic Flow sind alle per V2X ausgetauschten Informationen grün markiert und es wird eine Klassifikation in Fahrzeugdaten, Infrastrukturdaten und Manöverdaten vorgenommen.

1. Phasen 1 und 2 „Sensierung & Umfeldmodellierung“

EGO und benachbarte Fahrzeuge / umgebender Verkehr	Verkehrsinfrastruktur
1.1 Streckeninfo und Verkehrsinformationen abrufen.	
	1.2 Verkehrsinformationen liefern (strategischer Support, Output: <i>Infrastrukturdaten</i>).
1.3 Verkehrsinformationen empfangen (Input: <i>Infrastrukturdaten</i>).	

EGO und benachbarte Fahrzeuge / umgebender Verkehr	Verkehrsinfrastruktur
1.4 Fahrzeuginformationen von situationsrelevanten Fahrzeugen empfangen (Input: CAM/DENM, Sensordaten / Fahrzeugdaten).	
1.5 Eigene Sensordaten abrufen (Input: Umfeldsensorik + CAN des Ego-Fahrzeugs).	
1.6 Fusion der o.g. Daten (Input: 1.3, 1.4, 1.5).	
1.7 Eigene Fahrzeugdaten senden (Output: eigene CAM/DENM, eigene Sensordaten / Fahrzeugdaten)	

Tabelle 1.2: Basic Flow in den Phasen 1 und 2 „Sensierung & Umfeldmodellierung“ der Funktion F1

Störungen	Alternativen	Folgen
S1.1 Ausfall der Kommunikation	<i>ggf. Definition in TP2</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>
S1.2 Widersprüchliche / inkonsistente Umfeldinformationen	A1.1 Situationsbewertung der Fahrzeuge differiert	Keine Kooperation möglich. Funktion nicht verfügbar.
S1.3 Fehler bei Lokalisierung (GNSS oder Karte)	A1.2 Situationsbewertung der Fahrzeuge differiert	Keine Kooperation möglich. Funktion nicht verfügbar.
	A1.3 Informationen aus Verkehrsinfrastruktur nicht nutzbar	

Tabelle 1.3: Störungen und Alternativen in den Phasen 1 und 2 „Sensierung & Umfeldmodellierung“ der Funktion F1

2. Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.1 „Kooperationsanfrage“)

EGO und benachbarte Fahrzeuge / umgebender Verkehr	Verkehrsinfrastruktur
2.1 Kooperationsbedarf für Einfädelmanöver anhand des Umfeldmodells erkennen.	
2.2 Kooperationsanfrage an benachbarte Fahrzeuge stellen (Output: V2X-Nachricht, Manöverdaten).	

EGO und benachbarte Fahrzeuge / umgebender Verkehr	Verkehrsinfrastruktur
	2.3 Ggf. Kooperationsanfrage von EGO empfangen (Input: <i>V2X-Nachricht, Manöverdaten</i>).
	2.4 Ggf. kooperatives Manöver planen (unter Nutzung der Daten aus der Verkehrsinfrastruktur, V2V und bordeigener Sensorik) und mittels geeigneter Metrik bewerten.
	2.5 Ggf. wahrscheinliche Manöver auswählen und bewerten, ob diese Manöver aktuell unterstützt werden könnten
	2.6 Mit Akzeptanz oder Ablehnung der Kooperation antworten (Output: <i>V2X-Nachricht, Manöverdaten</i>).

Tabelle 1.4: Basic Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.1 „Kooperationsanfrage“) der Funktion F1⁵

Störungen	Alternativen	Folgen
S2.1 Ausfall der Kommunikation	<i>ggf. Definition in TP2</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>
S2.2 Keine kooperationsbereiten Fahrer	A2.1 Es gibt kein Angebot für eine Kooperation	Keine Kooperation möglich. Funktion nicht verfügbar.
S2.3 Einfädelspur endet	A2.2 Fahrerunterstützung unter Einhaltung der StVO nicht möglich	Fahrerwarnung / Situation muss manuell gelöst werden oder automatische Bremsung (<i>ggf. Definition in TP2</i>).

Tabelle 1.5: Störungen und Alternativen in Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.1 „Kooperationsanfrage“) der Funktion F1

⁵ Dieser Schritt könnte auch übersprungen werden, d.h. es ist möglich, dass ein ausgestattetes Fahrzeug auf der HF den Einfädelwunsch eines auffahrenden Fahrzeugs erkennt und von sich aus ohne vorherige Kooperationsanfrage ein kooperatives Manöver plant und ein Kooperationsangebot an den Einfädler sendet. Es ergeben sich damit leichte Anpassungen in den Punkten 2.1, 2.2 und 2.3 die Richtung der Kommunikation betreffend. Da jedoch keine Änderungen in den Nachrichteninhalten erwartet werden, wird dieser Fall hier nicht detailliert ausformuliert.

3. Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.2 „Manöverauswahl“)

EGO und benachbarte Fahrzeuge / umgebender Verkehr	Verkehrsinfrastruktur
3.1 Kooperationsbestätigung von Fahrzeugen auf Hauptfahrbahn empfangen (Input: V2X-Nachricht, Manöverdaten)	
3.2 Für jedes kooperationsbereite Fahrzeug: Einfädelmanöver planen und hinsichtlich geeigneter Metrik bewerten	
3.3 Optimale Manöver und kooperierende(s) Fahrzeug(e) auswählen	
3.4 Manöverplan mitteilen (Output: V2X-Nachricht, Manöverdaten)	
	3.5 Manöverplan von Ego empfangen (Input: V2X-Nachricht, Manöverdaten)
	3.6 Bewerten, ob dieses Manöver aktuell unterstützt werden kann
	3.7 Manöverbestätigung oder -ablehnung an Ego senden (Output: V2X-Nachricht, Manöverdaten)

Tabelle 1.6: Basic Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.2 „Manöverauswahl“) der Funktion F1

Störungen	Alternativen	Folgen
S3.1 Ausfall der Kommunikation	<i>ggf. Definition in TP2</i>	<i>ggf. Definition in TP2.</i>
S3.2 Dritte Fahrzeuge stören das Manöver / besetzen die Lücke	A3.1 Ausgewähltes Manöver nicht mehr realisierbar	Neue Manöveranfrage und -abstimmung.
S3.3 Einfädelspur endet	A3.2 Fahrerunterstützung unter Einhaltung der StVO nicht möglich	Fahrerwarnung / Situation muss manuell gelöst werden oder automatische Bremsung (<i>ggf. Definition in TP2</i>).

Tabelle 1.7: Störungen und Alternativen für Phase 3 „Manöverplanung“ (Teilphase 3.2 „Manöverauswahl“) der Funktion F1

4. Phase 4 „Manöver durchführen, kontrollieren und abschließen“

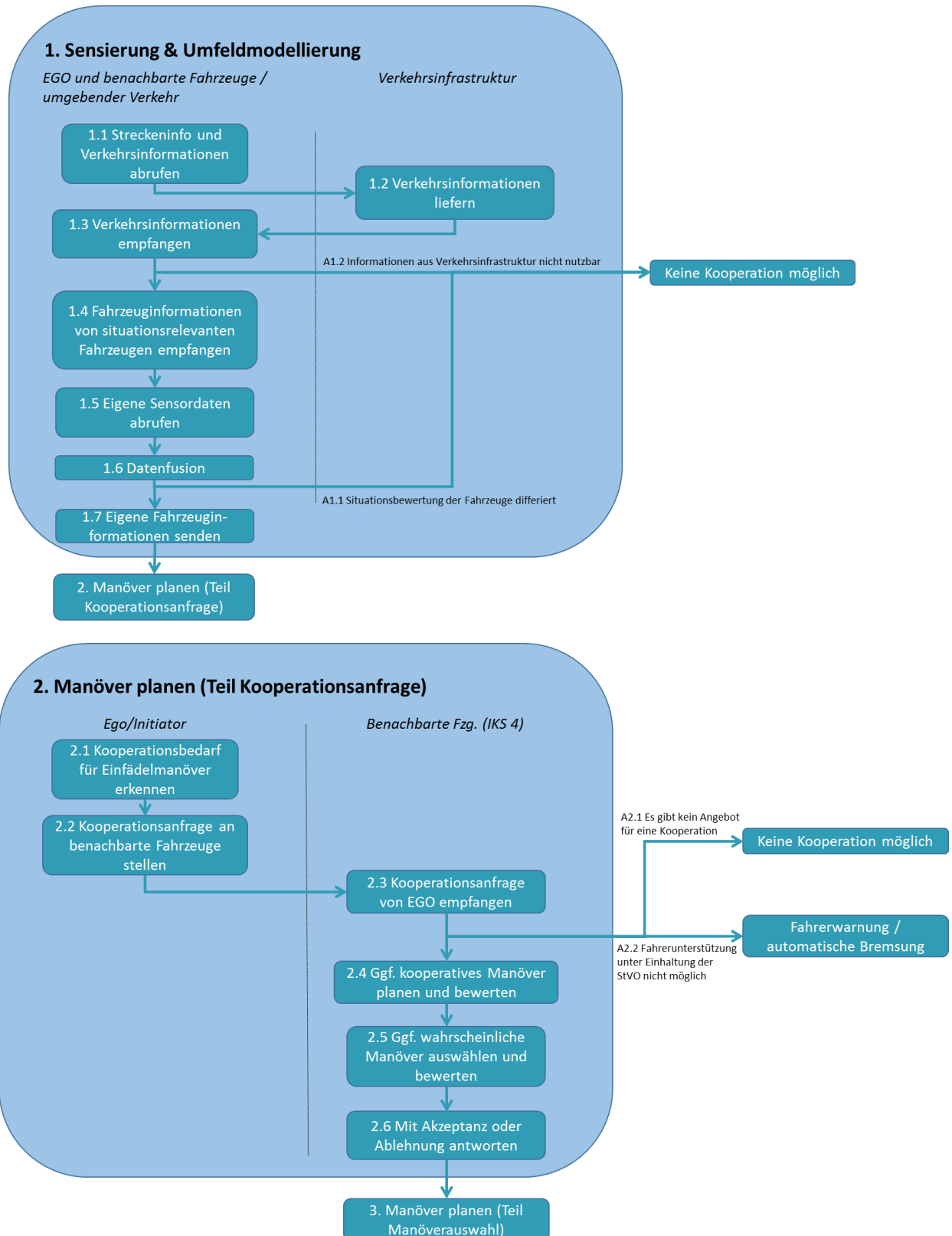
Ego/Initiator	Benachbarte Fahrzeuge (IKS 4)	weitere Fahrzeuge (IKS 0 bis IKS 2)
4.1 Einfädelmanöver durchführen		4.2 ggf. Manöver auf kooperierende Fahrzeuge anpassen
4.3 Andere Fahrzeuge auf Befolgung/Störung des Manövers überprüfen, Umsetzung ggf. durch KeepAlive-Nachrichten ⁶ (Input/Output: V2X-Nachricht, Manöverdaten)		
4.4 Manöver wird abgeschlossen		

Tabelle 1.8: Basic Flow in Phase 4 „Manöver durchführen, kontrollieren und abschließen“ der Funktion F1

Störungen	Alternativen	Folgen
S4.1 Ausfall der Kommunikation	ggf. Definition in TP2	ggf. Definition in TP2
S4.2 Fahrer übersteuert	A4.1 Manöver wird nicht oder anders als abgestimmt durchgeführt (vom EGO oder einem anderen kooperierenden Fahrzeug)	Abbruch des laufenden Manövers. Übergabe an den Fahrer. Ggf. neue Manöveranfrage, -abstimmung und -durchführung.
S4.3 Dritte Fahrzeuge stören das Manöver/zerstören die Lücke	A4.2 Manöver kann nicht mehr wie abgestimmt durchgeführt werden	Abbruch des laufenden Manövers. Übergabe an den Fahrer. Ggf. neue Manöveranfrage, -abstimmung und -durchführung.
S4.4 Einfädelspur endet	A4.3 Fahrerunterstützung unter Einhaltung der StVO nicht möglich	Fahrerwarnung / Situation muss manuell gelöst werden oder automatische Bremsung (ggf. Definition in TP2)

Tabelle 1.9: Störungen und Alternativen für Phase 4 „Manöver durchführen, kontrollieren und abschließen“ der Funktion F1

⁶ Nachricht dient einer regelmäßigen Bestätigung durch alle kooperierenden Partner, dass ein ausgehandeltes Manöver weiterhin befolgt wird. Ein Bit wäre ausreichend. Da es zu Kanalfehlern kommen kann, ist eine passive Bestätigung durch die Nichtversendung einer Nachricht zum Manöverabbruch nicht ausreichend.



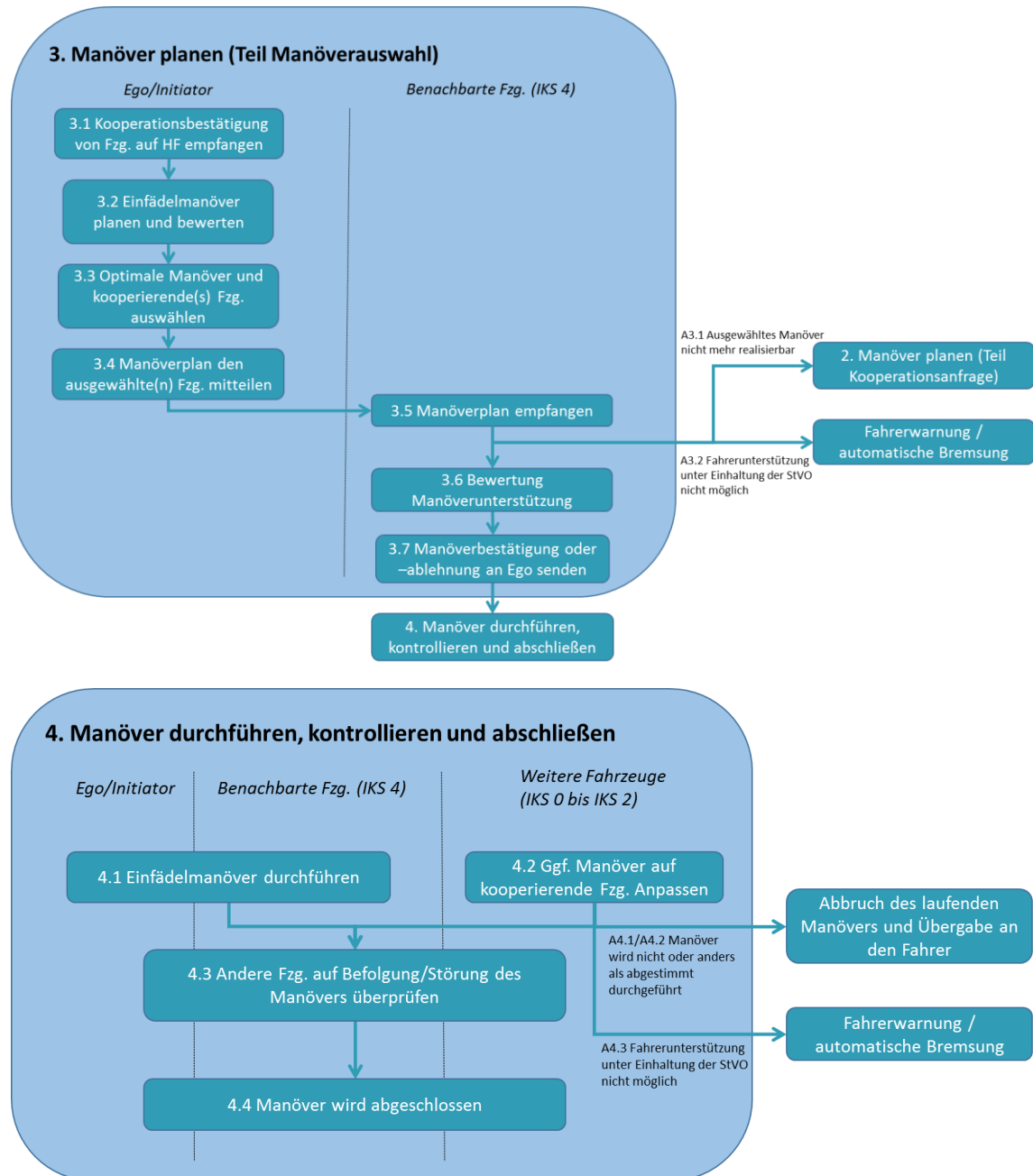


Abbildung 1.6: Interaktionsdiagramme der Funktion F1 aus Fahrzeugsicht

1.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der Literaturanalyse zum Use Case UC1 „Einfädeln auf Autobahnen“ sowie der sich daraus ergebenden Implikationen für die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) gegeben.

1.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands

Einfädelvorgänge zählen zu den anspruchsvollsten Manövern im Straßenverkehr (Buld et al., 2006; de Waard et al., 2009). Der Fahrer muss zahlreiche Teilaufgaben gleichzeitig ausführen.

Marczak et al. (2013) definieren drei unterschiedliche Varianten des Einfädelns, indem sie normales Einfädeln („free merge“) vom erzwungenen Einfädeln („challenged merge“) und freundlichen Einfädeln abgrenzen. Normales Einfädeln findet statt, wenn der Fahrer beim Einfädeln ausreichend große Lücken vorfindet, in die er einfahren kann. Beim erzwungenen Einfädeln forciert das Ende der Auffahrtspur das Einfädeln und der Fahrer akzeptiert mit steigendem Einfädelldruck kleinere Lückengrößen (Louah et al., 2011). Beim freundlichen Einfädeln wechseln Fahrer auf der rechten Spur der Autobahn die Spur oder bremsen ab, um Einfädelern das Einfahren zu erleichtern (Kita, 1999).

Die Literaturrecherche zeigt, dass insbesondere folgende Bedingungen das Auffahren auf Landstraßen und Autobahnen erschweren (Buld et al., 2006; de Waard et al., 2009):

- Hohe Verkehrsdichte und -dynamik,
- Viele Lkw auf der rechten Spur der Autobahn,
- Langsames vorausfahrendes Fahrzeug auf dem Beschleunigungsstreifen,
- Kurzer Beschleunigungsstreifen (z.B. aufgrund einer Baustelle),
- Individuelle Fahrereigenschaften wie z.B. geringe jährliche Fahrleistung (vor allem auf Autobahnen) und höheres Alter.

Wenn Möglichkeiten der kooperativen Fahrzeuginteraktion ausgelotet werden, spielen zeitliche Parameter der Fahrzeuginteraktion eine zentrale Rolle. Das Zeitfenster, um eine Interaktion mit einem (oder mehreren) anderen Fahrzeugen abzustimmen, beträgt beim Einfädeln nur wenige Sekunden. So dauert das Einfädeln selbst laut Sivaraman et al. (2013) im Mittel ca. 4 s. Unter Ausnutzung der Einfädelspur und mit frühzeitiger Ankündigung einer baldigen Kooperationsmöglichkeit, die Fahrer unter Umständen noch gar nicht sehen können, erweitert sich dieses Zeitfenster auf maximal 8-10 s (vgl. Louah et al., 2011).

Bei Untersuchungen im Realverkehr sind in der Regel nach der Hälfte der Auffahrtspur bereits mehr als 50% der Fahrzeuge auf die rechte Spur gewechselt (Louah et al., 2011, Marczak et al., 2013). Im Verlauf des Einfädelns auf die Autobahn kann sich aus verschiedenen Gründen das potenzielle Hinterfahrzeug auf der rechten Spur ändern. Eine Änderung kann unter anderem dadurch verursacht werden, dass (1) der Einfädler ein Fahrzeug auf der rechten Spur passiert, (2) von einem Fahrzeug auf der rechten Spur überholt wird oder (3) ein Fahrzeug von der linken auf die rechte Spur der Autobahn (oder vice versa) wechselt. Die Anzahl der potenziellen Hinterfahrzeuge, mit denen ein Einfädler interagiert, beläuft sich in 39.9% der Fälle auf einen potenziellen Kooperationspartner, in 39.3% der Fälle auf zwei Partner, in 17.6% der Fälle auf drei Partner und in 3.2% der Fälle auf vier (oder mehr) Partner (Louah et al., 2011).

Eine wichtige Frage bei der Betrachtung von Interaktionen im Straßenverkehr ist jene nach der Parametrisierung der zu untersuchenden Situationen (Maag, 2004). Mehrere Untersuchungen zeigen, dass die Situationsbeurteilung beim Einfädeln von der TTC- (Time-to-collision) Differenz der beiden interagierenden Fahrzeuge (Fahrzeug auf der rechten Spur der Autobahn, auffahrendes Fahrzeug) zu einem Referenzpunkt (z.B. Anfang/Ende der Einfädelspur) abhängt (Maag & Mark, 2012). Die Studien zur TTC-Differenz (Maag, 2004; Maag & Mark, 2012) zeigen einen Perspektiveneffekt: Fahrer, die bereits auf der Autobahn unterwegs sind, sehen die Lücke vor sich als weniger geeignet an als Fahrer, die auf die Autobahn auffahren. Das bedeutet, dass Fahrer eine Situation aus ihrer eigenen Fahrintention heraus beurteilen und dabei durchaus egoistisch sind.

Systeme, die das Einfädeln unterstützen, müssen entscheiden, (1) welches Fahrzeug an erster Position durch die Eng- bzw. Einfädelstelle fährt, (2) wie sich Fahrzeuge auf der rechten Spur verhalten sollen, um Einfädler das Einfahren zu ermöglichen und (3) wie sich der Einfädler selbst verhalten soll, um die ihm zugedachte Lücke zu erreichen (Pueboobpaphan et al., 2010).

Algorithmen und Assistenzkonzepte zur Unterstützung des Auffahrens beeinflussen entweder nur das auffahrende Fahrzeug oder zusätzlich ein bzw. mehrere Fahrzeuge, die bereits auf der Autobahn unterwegs sind. Weiterhin unterscheiden sich die Ansätze durch das Ausmaß der zentralen Kontrolle, d.h. ob es ein Kontrollzentrum gibt, das Anweisungen gibt, oder jedes Fahrzeug eine mit den jeweils relevanten Fahrzeugen abgestimmte Empfehlung erstellt (Scarinci und Heydecker, 2014).

Die Assistenz unterscheidet sich auch in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Scarinci & Heydecker, 2014). So werden beim manuellen Fahren Displays verwendet, die dem Fahrer Anweisungen geben (z.B. die Geschwindigkeit zu reduzieren, um eine Lücke zu erzeugen; Daamen et al., 2011). Das Einfädelproblem tritt jedoch auch bei vollautomatisierten Fahrzeugen (Antoniotti et al., 1997; Hall & Li, 2001; Yang et al., 1993) sowie bei teil- und hochautomatisierten Fahrzeugen mit kooperativen ACC-Systemen auf (Kanavalli et al., 2008; Milanés et al., 2011; Pueboobpaphan et al., 2010; Wang et al., 2009; Xu & Sengupta, 2003).

Um die Ablenkung durch fahrzeuginterne Displays (vgl. Knake-Langhorst et al., 2014) zu vermeiden, werden Enhanced-Reality Elemente untersucht, die dem Fahrer die Lückenfindung erleichtern bzw. Lückenempfehlungen geben und auch den umgebenden Verkehr über das geplante Manöver informieren können (Maag & Mark, 2012; Maag et al., 2012). Die Ergebnisse zeigen, dass die Fahrer auf die Hinweise des Einfädelassistenten reagieren und das Einfädeln des auffahrenden Fahrers sicherer wird.

1.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung

Folgende Empfehlungen zur MMI-Gestaltung können aus der Literaturrecherche abgeleitet werden:

1. Einfädeln ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die die volle Aufmerksamkeit des Fahrers benötigt. Ein Einfädelassistent muss demnach selbsterklärend und einfach gestaltet sein, damit weiterhin die gesamte Aufmerksamkeit auf die komplexe und anspruchsvolle Fahraufgabe

des Einfädelns gerichtet bleiben kann. Auf zusätzliche Anzeigeelemente im Fahrzeug (v.a. im Kombiinstrument) sollte während des Einfädelns soweit möglich verzichtet werden.

2. Im Gegensatz zu Fahrzeugen, die an einer Kreuzung warten oder ausparken wollen, ist das Einfädeln zeitkritisch. Fahrer akzeptieren bei zunehmendem Einfädelndruck kleinere Lücken. Für eine Abstimmung bzw. Empfehlung stehen nur wenige Sekunden zur Verfügung.
3. Ein Assistent sollte nicht zu weit entfernte Lücken empfehlen bzw. automatisiert ansteuern, da die meisten Fahrer eher frühzeitig wechseln und nicht am Ende der Einfädelspur zum Anhalten gezwungen werden möchten. Ein deutlich anderes Verhalten des Assistenten könnte die Akzeptanz beeinträchtigen.
4. Da die Längsregelung vom Fahrer hochgeübt ist und vom manuell fahrenden Fahrer automatisiert durchgeführt wird, sollten Verhaltensempfehlungen entweder sehr einfache Handlungsanweisungen sein (z.B. „Fuß vom Gas“) oder Handlungsziele angeben (z.B. indem eine Ziellücke markiert wird).
5. Ist die Längsregelung durch ACC-Systeme automatisiert, sollte das automatische System sein kooperatives Verhalten erklären, um dieses für den Fahrer nachvollziehbar zu machen und so die Akzeptanz zu erhöhen.

1.4 Weitere funktionspezifische Untersuchungsgegenstände

Im Rahmen der Use Case-Analyse wurden durch die Projektpartner eine Reihe von Fragestellungen identifiziert, die über die Perspektive, die TP1 einnimmt, hinausgehen, die aber für die weitere inhaltliche Ausplanung der folgenden Teilprojekte TP2, TP3, TP4 bzw. TP5 relevant sein könnten:

- In welchen Anwendungsfällen ist ein Austausch von kooperativen Nachrichten nützlich? Wann kann auf Teile der Kommunikation (insbesondere die Abstimmung betreffend) verzichtet werden? Welche Teile der Kommunikation sind situationsunabhängig immer hilfreich? In welchen Fällen sollte mit Abstimmung kooperiert werden (z.B. Vermeidung potenzieller Missverständnisse, dichter Verkehr)? Bewertungsziel: Vermeidung nutzloser Datenübertragung per V2X.
- Vorstellbar wäre ein zweistufiges Vorgehen in der Kommunikation: (1) IMAGinE Kooperationsstufe 2 (Austausch von Sensordaten), danach ggf. (2) IMAGinE Kooperationsstufen 3 und 4 (Mitteilung von Kooperationsabsicht, Abstimmung und Durchführung von kooperativen Fahrmanövern). Der zweite Schritt folgt jedoch nur, wenn das involvierte Fahrzeug auf der HF und/oder das einfädelnde Fahrzeug die Notwendigkeit sieht (z.B. keine Lücke auf HF vorhanden, Lücke nicht ohne Behinderung nutzbar).
- Aufbauend auf dem letzten Punkt wäre eine Zerlegung der Funktion in zwei Teilfunktionen denkbar. Teilfunktion 1 würde auf „das Suchen einer Lücke“ ohne Kooperationsnachrichten fokussieren. Diese Teilfunktion würde eine Bahnplanung umsetzen, die vorhandenen Lücken bewertet und passend einfädelt. Eine Teilfunktion 2 würde nur dann greifen, wenn

keine Lücke gefunden werden kann. Nur in diesem Fall würden entsprechende Kooperationsnachrichten versendet werden. Untersuchungsgegenstände beider Teilfunktionen wären die Wirkung auf den umgebenden Verkehr, die MMI-Auslegung sowie ggf. Art und Umfang des notwendigen kooperativen Nachrichtenaustauschs.

- Welche besonderen Anforderungen entstehen, wenn das Einfädeln von Lkw unterstützt werden soll? Entstehen z.B. höhere Anforderungen an die Verbindlichkeit der Kommunikation? Müssen in diesem Fall mehrere Fahrzeuge auf der HF kooperieren? Ist ein kooperativer Spurwechsel auf der HF möglich oder überhaupt gesetzlich erlaubt?
- Welche besonderen Anforderungen entstehen bei der Kooperation zwischen unterschiedlichen Automatisierungsgraden, insbesondere zwischen manuell gesteuerten und hochautomatisierten Fahrzeugen? Welche besonderen Anforderungen entstehen durch etwaige Fahrerübernahmen in den Auffahrten und Verflechtungsbereichen?
- Wie kann eine Einbindung von strategischem Support aus der Verkehrsinfrastruktur gelingen? Ein zu lösender möglicher Zielkonflikt betrifft die lokale vs. globale Fahrzeitminimierung.
- Wie stark kann / sollte ein kooperatives Fahrzeug auf der HF verzögern (z.B. max. Schleppmoment)? Was ist für den Fahrer akzeptabel? Was wäre die daraus folgende Reichweitenanforderung an die V2X-Kommunikation bzw. was sind die Funktionsgrenzen?
- Es ist zu prüfen, ob ausschließlich das auffahrende Fahrzeug einen initialen Kooperationswunsch äußern kann, oder ob auch Fahrzeuge auf der HF die Kooperation initiieren können (z.B. Fahrzeug auf HF sieht wartendes Fahrzeug auf der Auffahrtspur). Welche Störungen / Problemfälle können daraus entstehen? Gibt es daraus einen zusätzlichen Funktionsnutzen?
- Es stellt sich die Frage, welche Rolle das durch Blick auf andere Verkehrsteilnehmer wahrnehmbare Fahrverhalten, sowie die Mitteilung der Kooperationsintention durch das eigene Fahrverhalten in Bezug auf MMI spielt. Das Erkennen der Intention anhand von Fahrmanövern wurde bereits in früheren Publikationen als Faktor in der Manöverabstimmung im Straßenverkehr erkannt.⁷ Die bisherigen in IMAGinE durchgeführten Nutzerbefragungen bestätigen das.⁸
- Welche Verkehrsinfrastrukturdaten können mit Fokus auf den Einfädelassistenten den gesamten Verkehrsfluss positiv beeinflussen? Wie können diese Daten in die Funktion eingebunden werden? Grundsätzlich denkbar sind zwei Datenarten:
 - Straßendaten: z.B. Länge der Auffahrt, hartes Ende der Auffahrt, ggf. Steigung. Derartige Daten großflächig zur Verfügung zu stellen, wäre herausfordernd.

⁷ Bengler, K., Zimmermann, M., Bortot, D., Kienle, M., & Damböck, D. (2012). Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. *It - Information Technology*, 54(4), 157–164.

⁸ Für eine Zusammenfassung der in TP1 durchgeführten Studie „Qualitative Befragung zur Analyse der Relevanz identifizierter Faktoren für Akzeptanzkriterien“ siehe Deliverable D1.3 (Kapitel 4).

- Verkehrsdaten: z.B. Verkehrsdichte und -stärke vor bzw. nach der Auffahrt. Derartige Daten können grundsätzlich zur Verfügung gestellt werden. Ein Einfluss auf ein konkretes Fahrmanöver ist denkbar, z.B. könnte bei dichtem Verkehr ein Abbremsen oder Verzögern möglicherweise zu Staufronten im Rücklauf führen und sollte vermieden werden. In diesem Fall wären ggf. Beschleunigungsmanöver geeigneter, um Lücken zu öffnen.
- Die vorliegende Literaturstudie lenkt den Blick auf zahlreiche Faktoren, die den Nutzen aus Sicht des Fahrers und der Verkehrsinfrastruktur beeinflussen. Diese sind im weiteren Projektablauf ggf. von Bedeutung, um das System optimal auszulegen. Nachfolgend sind diese in Kurzform ausgeführt und konkrete Folgen für die Funktionsentwicklung beschrieben:
 - Der Ablauf des manuellen Einfädelns (durch den Menschen durchzuführende Teilaufgaben) wird beschrieben. Folge:
 - Das Assistenzsystem muss diese Schritte durchlaufen bzw. diese abbilden. Das könnte ein Prüfkriterium sein, mit dem die funktionsübergreifende Systemarchitektur aus TP2 bzw. der Funktionsablauf bewertet werden kann.
 - Sind Fahrzeuge auf der HF mit aktiviertem (herkömmlichem, d.h. unverbunden und ausschließlich auf Bordsensorik basierendem) ACC unterwegs, sinkt die Kooperationswahrscheinlichkeit, da ein Bremsenriff das System deaktivieren würde.
 - Langes Warten beim Auffahren verringert die als akzeptabel geltende Lückengröße für den Einfädler und erhöht damit die Wahrscheinlichkeit eines erzwungenen Einfädelmanövers. Dazu passt eine andere phänomenologische Studie, die beschreibt, dass es ein Anhalten am Ende der Auffahrt praktisch nicht gibt. Folge für das manuelle Auffahren:
 - Wenn die Auffahrt zu Ende ist, erfolgt ein erzwungenes Einfädeln auf die HF mit entsprechenden Auswirkungen auf den rückwärtigen Verkehr.
 - Im Mittel existiert beim manuellen Auffahren eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Einfädler und den Fahrzeugen auf der HF von 5-10 km/h. Wird früh eingefädelt (ohne Nutzung der gesamten Auffahrt) ist es bedeutend mehr. Folgen:
 - Ein Bremsenriff / Anlegen eines Schleppmoments bis zu dieser Schwelle durch eine automatisierte Einfädelfunktion kann den Verkehrsfluss auch bei dichtem Verkehr nicht negativ beeinflussen.
 - Eher im Gegenteil: Da der Geschwindigkeitsabbau über einen automatisierten Einfädelassistenten über eine längere Strecke verteilt wird, ist der Schock auf den Verkehr der HF in jedem Fall geringer als beim manuellen Auffahren.
 - Ein Einfädelassistent sollte in jedem Fall versuchen die Differenzgeschwindigkeit zur HF gegen 0 km/h zu bringen, um eine negative Auswirkung auf den rückwärtigen Verkehr auf der HF auszuschließen. Es könnte zu einem Trade-Off zwischen dem technisch optimalen Verhalten und der Erwartungshaltung des Fahrers kommen (siehe Kapitel 1.3.2, Punkt 3).

- In 60% der Einfädelvorgänge gibt es eine potentielle Kooperationssituation mit zwei oder mehr Partnern. Folge:
 - Die Funktionsauslegung (inklusive Kommunikationsbeziehungen) muss diese Fälle abbilden können.
- Diverse Studien geben Hinweise auf den zeitlichen und räumlichen Ablauf von Einfädelvorgängen. Diese sind bei Simulationen, der Nutzenfalldefinition und im Rahmen der Evaluierung zu beachten.
- Typische menschliche Situationswahrnehmung auf HF sieht Lücken als kritischer an als sie der einfädelnde Fahrer bewertet. Folgen:
 - Wird das in der Entwicklung nicht beachtet, werden Fahrer auf der HF Kooperationsanfragen öfter ablehnen bzw. automatische Einfädelvorgänge tendenziell eher abbrechen wollen.
 - Ggf. entstehen Herausforderungen für das MMI der Fahrzeuge auf HF. Das MMI muss diesen Wahrnehmungsunterschied bei der Fahrerinformation beachten und könnte gezielt diesen Unterschied ausgleichen.
- Es werden diverse Modelle für die Akzeptanz einer Lücke beschrieben. Diese könnten zur Auslegung der notwendigen technischen Lückenbewertung herangezogen werden.
- Ein informierendes System hilft nur dann, wenn es sehr frühzeitige Hinweise und nachvollziehbare Handlungsempfehlungen gibt.

2 FUNKTION 2: KOOPERATIVE LÄNGSFÜHRUNG AUF AUTO-BAHNEN

2.1 Beschreibung

Die Funktion „Kooperative Längsführung auf Autobahnen“ nutzt Kooperation und optional kollektive Perzeption zur Optimierung der Längsführung eines Fahrzeuges. Aktuelle Längsführungssysteme (Adaptive Cruise Control, ACC) nutzen fahrzeugeigene Sensorik zur Erfassung (direkt) vorausfahrender Fahrzeuge und regeln über Beschleunigung und Verzögerung den Abstand zum führenden Fahrzeug. Diese Systeme sind limitiert durch Erfassungsgenauigkeit, -Reichweite und -Latenz der genutzten Sensorik. Zurzeit in Serienfahrzeugen verfügbare Systeme nutzen üblicherweise eine Kombination aus bildbasierter Erfassung und Radar-Sensorik. Sie sind in der Lage, den Abstand im Bereich von ca. 1-2 s Folgezeit und im Geschwindigkeitsbereich von 0 km/h bis 200 km/h zu regeln (ISO 15622).

In der Funktion F2 wird eine Erweiterung der Abstandsregelfunktion mit Kommunikation und Kooperation angestrebt. Die Funktion F2 kann sämtliche in IMAGinE adressierten Kooperationsstufen berücksichtigen, um die Längsführung eines Fahrzeuges hinsichtlich Komfort, Effizienz und Sicherheit zu optimieren.

Für eine situative Regelung ist eine niedrige Kooperationsstufe ausreichend. Es werden situative Verkehrsinformationen in die Geschwindigkeitsvorgabe der Abstandsregelung (und dadurch die Abstandsregelung) einbezogen. Diese Information kann sowohl von der Verkehrsinfrastruktur als auch von vorausfahrenden und hinterherfahrenden Fahrzeugen gesendet werden. Die Längsführung kann u.a. an die gefahrene Geschwindigkeit der Fahrzeuge in der Kolonne voraus, an starke Verzögerung in der Kolonne voraus und auch an Ereignisse wie Stau oder Unfälle angepasst werden. Das Ego-Fahrzeug nutzt diese Informationen, um die Geschwindigkeit anzupassen, ggf. den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu erhöhen bzw. gezielt zu kontrollieren (in Einzelfällen auch zum Folgefahrzeug) oder um unnötige Beschleunigungsvorgänge zu reduzieren.

Neben der situativen Längsregelung, ist jederzeit auch eine direkte Optimierung der Regelung auf das unmittelbar vorausfahrende Fahrzeug möglich. Sofern das direkt vorausfahrende Fahrzeug Telemetriedaten wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung und ggf. eine Prognose der Längsregelung an die umliegenden Fahrzeuge übermittelt (ab IKS 3, siehe Abbildung 2.1), können diese Daten in die Längsregelung des Ego-Fahrzeuges einfließen. Diese Werte werden im Ego über die herkömmliche Fahrzeugsensorik wie Radar, Kamera und ggf. Lidar erfasst, können jedoch meist vom vorausfahrenden Fahrzeug in höherer Präzision und mit geringerer Latenz kommuniziert werden, so dass sich die Längsregelung im Ego-Fahrzeug optimieren lässt.

Zusätzlich können Fahrzeuge in benachbarten Fahrstreifen erfasst und ggf. gesetzte Fahrtrichtungsanzeiger erkannt werden. So lässt sich ein möglicher Spurwechsel eines benachbarten

Fahrzeuges in die eigene Fahrspur besser erkennen („Einscherer“) und wenn nötig kann die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges reduziert werden. Bei herkömmlichen ACC Funktionen wird ein Einscherer erst bei teils vollzogenem Spurwechsel erkannt und in die Regelung einbezogen – dadurch können, speziell bei hohen Differenzgeschwindigkeiten zwischen Ego und Einscherer, gefährliche Situationen auftreten.



Abbildung 2.1: Übertragung von Sensordaten an nachfolgendes Fahrzeug (Kollektive Perzeption)

Außer der direkten und situativen Längsregelung ermöglicht die Funktion eine Staufolgekolonne (siehe Abbildung 2.2). Als Kolonne bezeichnet man einen Fahrzeugverbund, der in geringem Abstand und in fester Reihenfolge fährt. Da diese eine wechselseitige Abstimmung zwischen den Fahrzeugen erfordert, wird für sie mindestens IKS 4 benötigt. Dabei können eines oder mehrere direkt in Kolonne fahrende Fahrzeuge den Abstand zwischen sich deutlich reduzieren und Geschwindigkeit und Beschleunigung synchronisieren. Diese Staufolgekolonne kann sich in Stausituationen dynamisch aufbauen und bei Stauende wieder auflösen. Durch Minimierung der Fahrzeugabstände und damit der Gesamtlänge der Kolonne im Vergleich zu regulärer Fahrt wird der Straßenraum effizienter genutzt und der Fahrzeugdurchsatz im Stau erhöht. Zudem werden durch die Synchronisierung der Geschwindigkeit der Komfort und die Sicherheit in einer Kolonne gesichert sowie eine Bildung von „Schockwellen“ bei Verzögerung verhindert. Da die Abstände die vorgegebenen Sicherheitsabstände deutlich unterschreiten können, sind eine einleitende und andauernde Absprache zwischen den Fahrzeugen und die Information des Fahrers zur Bildung der Kolonne unumgänglich.



Abbildung 2.2: Kollektive Perzeption ermöglicht Staufolgekolonne mit verringertem Abstand

Während des Fahrens in einer Staufolgekolonne ist natürlich weiterhin eine Erkennung von möglicherweise spurwechselnden Fahrzeugen in benachbarten Fahrstreifen möglich. Dies ist speziell bei längeren Kolonnen sogar unbedingt nötig, um eine „Blockierung“ von Auf- und Abfahrten zu vermeiden.

Im Folgenden werden die Relationen der IMAGinE Kooperationsstufen (IKS) zur Funktion F2 dargestellt.

Systeme mit IMAGinE Kooperationsstufe ≤ 2 (IKS ≤ 2)

Die mit klassischer V2X-Technologie ausgestatteten Fahrzeuge tauschen im Wesentlichen nur ihre Positions- und Bewegungsdaten aus. Es wird kein Rückkanal verwendet und es gibt daher auch keine Antwort auf eine gesendete Information.

In Funktion F2 können Fahrzeuge und Infrastruktur mit Kommunikation auf Basis CAM/DENM als Informationsquellen mit integriert werden. Diese Informationen können in die Längsregelung des Fahrzeuges zur situativen Optimierung einbezogen werden. So können die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit der vorausfahrenden Fahrzeuge sowie die erfassten Verkehrsereignisse wie z.B. Stau, Unfall oder hartes Bremsen in der Längsführung berücksichtigt werden.

Für die situative Regelung werden Informationen von der Infrastruktur oder den vorausfahrenden Fahrzeugen als Signal zur Erhöhung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug bzw. zur moderaten Reduktion der Geschwindigkeit genutzt. Die Intensität der Regelung hängt von Signifikanz, Wahrscheinlichkeit und möglicher Auswirkung der empfangenen Meldungen ab und wird im empfangenden Fahrzeug bestimmt. Je höher die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und die Konsequenzen daraus sind, desto stärker wird die Regelung angepasst. Gegebenenfalls wird der Abstand leicht erhöht (z.B. bei langsamer fahrenden Fahrzeugen voraus, die eine Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs bewirken werden) oder auch deutlich erhöht (z.B. bei Unfall oder harter Bremsung direkt voraus).

Weiterhin ist die Erkennung eines Einschervorgangs eines auf dem benachbarten Fahrstreifen fahrenden Fahrzeugs bereits mit IKS 2 möglich, indem verschiedene Informationen aus den

empfangenen CAM-Nachrichten ausgewertet werden. Ein Indikator neben anderen ist der Fahrtrichtungsanzeiger, aber auch die Orientierung des Fahrzeugs, aus der eine Orientierung relativ zur Spur berechnet werden kann, kann zur Erkennung eines Einscherers genutzt werden.

Systeme mit IMAGinE Kooperationsstufe 3 (IKS 3)

Zusätzlich zur Kooperationsstufe 2 werden Daten aus der bordeigenen Sensorik der mit V2X-Technologie ausgestatteten Fahrzeuge übertragen. Damit können nicht ausgestattete Fahrzeuge, die vor einem ausgestatteten Fahrzeug fahren, zuverlässig erkannt werden. Eine relativ geringe Ausstattungsquote genügt, um einen messbaren Funktionsnutzen zu erzeugen.

In der Funktion F2 wird die IKS 3 als Erweiterung der mit IKS 2 möglichen Funktionen betrachtet. So ist durch Übermittlung des Umfeldmodells eine präzisere Vorhersage des Fahrverhaltens des vorausfahrenden Verkehrs möglich und eine mögliche Erhöhung des Abstandes bzw. eine Verzögerung kann frühzeitiger und daher komfortabler erfolgen.

Durch kollektive Perzeption und ggf. präzisere Übermittlung der Eigenbewegung des vorausfahrenden Fahrzeugs kann bei direkter Abstandsregelung eine präzisere und komfortablere Folgefahrt ermöglicht werden.

Systeme mit IMAGinE Kooperationsstufen 4 und 5 (IKS 4 und IKS 5)

Zusätzlich übertragen hier alle mit V2X-Technologie ausgestatteten Fahrzeuge ihre Kooperationsabsichten und ermöglichen eine gemeinsame Manöverplanung.

In F2 werden in einer Staufolgekolonne diese Techniken genutzt, um die Planung, Absprache und Durchführung einer Staufolgekolonne zu ermöglichen. Das mögliche Manöver wird erkannt und zwischen beteiligten Fahrzeugen verhandelt. Nach Aufbau der Kolonne ist eine Folgefahrt bei minimiertem Abstand möglich, die die Effizienz des Stauverkehrs erhöhen kann.

2.1.1 Use Cases und Szenarien

Die Funktion F2 wurde ursprünglich in der Antragstellung in drei Use Cases gegliedert. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich um einen Use Case, der sich in unterschiedlichen Szenarien und in unterschiedlichen Kooperationsstufen verschieden ausprägt. Allen Szenarien gemeinsam ist, dass der Abstand des Fahrzeugs durch Kooperation mit anderen Fahrzeugen geregelt wird. Der Use Case „Kooperative Längsregelung“ gliedert sich in die Szenarien 1a „Regelung situativ optimieren“, 1b „Regelung direkt optimieren“ und 1c „Fahren in Staufolgekolonne“. Im ersten Szenario (1a) wird die Optimierung der Längsregelung mit durch Kommunikation verbesserter Situationsanalyse betrachtet. Eine verbesserte Folgefahrt hinter einem kooperativen Führungsfahrzeug wird durch das Szenario 1b abgedeckt. Mit erhöhter Kooperation wird schlussendlich in Szenario 1c das kooperative Staufolgefahren durchgeführt, in dem Fahrzeuge in einer Stausituation bei minimalem Abstand eine Kolonne bilden.

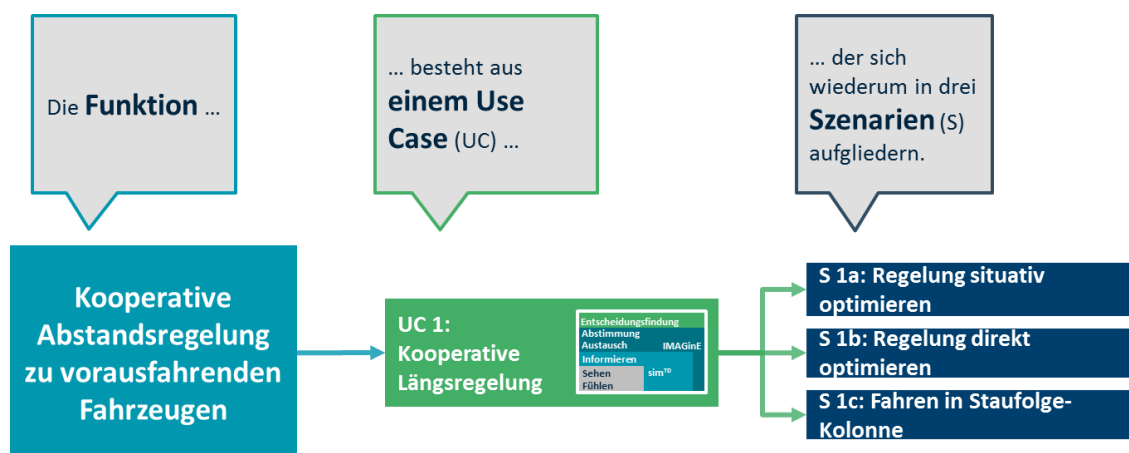


Abbildung 2.3: Funktionsbaum für Kooperative Längsführung auf Autobahnen

Im Szenario 1a nutzt die Funktion die verbesserte Informationserfassung in einem kooperativen Fahrzeug gegenüber mit herkömmlicher Sensorik fahrenden Fahrzeugen. Dabei werden Informationen von der Verkehrsinfrastruktur für die situative Längsoptimierung herangezogen. Darüber hinaus können Informationen von vorausfahrenden Fahrzeugen mit einbezogen werden, wie z.B. Informationen über Stauende oder Wetterinformationen. Dadurch lässt sich die Verkehrssituation im Bereich 100-1000 m vor dem Fahrzeug (also an der Grenze und außerhalb der Bordsensorik) erfassen und in die Fahrplanung integrieren. Eine Vielzahl von Projekten, zum Beispiel Adaptive, SATRE, KONVOI und AutoNet2030, haben den Einfluss von Kommunikation für eine direkte Folgefahrt bis 90 km/h bereits untersucht. Weiterhin konnten in Projekten, wie zum Beispiel TEAM, erste Erfahrungen im Bereich kooperativer Längsführung, basierend auf Informationen der Verkehrsinfrastruktur und Kommunikation mit umliegenden Verkehrsteilnehmern, erarbeitet werden. Dabei wurden aber nur Informationen von Lichtsignalanzeige, Baustellen, Geschwindigkeitsempfehlungen und Wetterinformationen verwendet.

Eine situative und direkte Längsregelung, auch außerhalb von Staus, unterscheidet das IMAGinE Projekt von vorangegangenen Projekten. Durch frühzeitige Erkennung von Durchschnittsgeschwindigkeit und verkehrsbeeinflussenden Situationen (Stau, Unfall, defektes Fahrzeug) kann das Ego-Fahrzeug seine Geschwindigkeit reduzieren und den Folgeabstand erhöhen sowie den Fahrer informieren und warnen. Auf diese Weise kann auf drohende Stausituationen frühzeitig reagiert und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs reduziert werden. Durch die geringere Geschwindigkeit wird die Sicherheit erhöht. Gleichzeitig kann eine höhere Effizienz, d.h. ein geringerer Kraftstoffverbrauch erreicht werden. Im Vergleich zu typischen existierenden Assistenten zur Längsregelung könnte damit auch die Stauauflösung aktiv unterstützt und der Verkehrsdurchsatz erhöht werden. Bei Annäherung an eine Stausituation kann zudem ein Übergang zum Szenario 1c erfolgen.

Im Szenario 1b wird hingegen die Situation direkt vor dem Fahrzeug betrachtet, also in dem Bereich der auch über die herkömmliche Sensorik erfasst wird. Bei Folgefahrt hinter einem kooperativen Fahrzeug kann die Regelung von Geschwindigkeit, Abstand und Beschleunigung jedoch mit den über V2X übermittelten Daten optimiert werden. Im Vergleich zu bestehenden

Abstandsregeltempomaten erfolgt das meist wesentlich schneller, da Informationen über die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs aus V2X-Nachrichten in der Regel weniger Verzögerung aufweisen als Informationen aus fahrzeugeigener Sensorik.

In diesem Szenario werden Informationen der umgebenden Fahrzeuge für die Längsoptimierung herangezogen. In der Regel sind hierfür die Informationen vorausfahrender Fahrzeuge von Belang. Jedoch können auch die Informationen des Folgefahrzeugs – beispielsweise zur Mitwirkung bei der Vermeidung einer sicherheitsrelevanten Auffahrsituation – herangezogen werden. Die Präzision der übermittelten Werte, die vor allem bei Beschleunigung und höher abgeleiteten Werten (m/s^3 , sog. Ruck) direkt im vorausfahrenden Fahrzeug gemessen und übertragen werden, ist meist höher als die von der Sensorik des nachfolgenden Fahrzeugs ermittelten Werte. Zudem ist durch Beachtung der von anderen Fahrzeugen übermittelten Werte die frühzeitige Erkennung eines möglichen Fahrstreifenwechsels darstellbar. Dazu können übermittelte Informationen, wie der Status des Richtungsanzeigers oder die Orientierung des Fahrzeugs verwendet werden. Wenn eine solche Situation erkannt wird, kann die Abstandsregelung darauf reagieren und eine Lücke für das in die Fahrgasse einscherende Fahrzeug herstellen. Sollten Vorausfahrer oder Einscherer nicht ausgerüstet sein, so erfolgt die Abstandsregelung mit der fahrzeugeigenen Sensorik, d.h. mit dem konventionellen Abstandsregler. Dieser kann aber auch dann noch situativ angepasst werden durch Meldungen von anderen Fahrzeugen oder von der Infrastruktur.

Szenario 1c tritt ein, wenn sich das Ego-Fahrzeug in einem Stau befindet und sich in der Umgebung weitere Fahrzeuge befinden, die für IKS-Stufe 4 oder 5 geeignet sind. In diesem Fall kann eine Staufolgekolonne initiiert werden. Hier sollen sich kooperative Fahrzeuge dynamisch zu einem Verbund zusammenfügen und für die Dauer des Staus mit geringem Abstand und synchroner Geschwindigkeit fahren, um Komfort und Effizienz zu optimieren. Ein Problem der Längsregelung einer Kolonne ist die Kolonnenstabilität. Naus et al. (2010) zeigen, dass die Kolonnenstabilität verbessert werden kann, indem die übliche auf Sensorik basierende Längsregelung um Kommunikation erweitert wird. Öncü et al. (2014) zeigen aber, dass hohe Verzögerung durch Kommunikation einen negativen Einfluss auf die Kolonnenstabilität hat. Keines der vorangegangenen Projekte hat die Möglichkeit untersucht, durch Verzögerungen entstehende „Schockwellen“ mithilfe einer Manöverplanung zu reduzieren. Instabilität in einer Kolonne entsteht hauptsächlich dadurch, dass die Reaktionszeiten addiert werden, wenn jedes Fahrzeug nur auf das direkt vor ihm fahrende reagiert. Mit V2X können weitere vorausfahrende Fahrzeuge in der Kolonne berücksichtigt werden, so dass eine frühere Reaktion erreicht werden kann. Der erweiterte Planungshorizont durch die kooperative Manöverplanung wirkt sich dabei positiv auf die Kolonnenstabilität der Längsregelung aus. Durch Perzeption und Manöverplanung kann eine Regelung entworfen werden, die unnötige Beschleunigungsvorgänge verhindert, die Kolonnenstabilität erhöht und damit den Verkehrsdurchsatz verbessert.

Die Kolonne wird bei Erkennung eines Stauendes zwischen Fahrzeugen verhandelt, aufgebaut und durchgeführt. Da hier eine mögliche Einschersituation durch den minimierten Abstand ein

deutlich erhöhtes Unfallrisiko birgt, wird die rechtzeitige Erkennung und Behandlung eines Einscherers auch in diesem Szenario betrachtet. Da die Funktion zeitlich nicht beschränkt ist, sind auch das Hinzukommen von weiteren Fahrzeugen zur Kolonne sowie das Verlassen einzelner Teilnehmer vorgesehen.

2.1.2 Priorisierung von Use Cases

Im Unterschied zu den anderen beschriebenen Funktionen können diese Szenarien auch gleichzeitig stattfinden oder aufeinander aufbauen. Die Szenarien 1a, 1b und 1c können zwar auch jedes für sich auftreten. Jedoch sind bei aktiver Funktion auch stets die Szenarien 1a und 1b parallel möglich. Das Szenario 1c kann ebenso eintreten, während sich die Funktion bereits in den Szenarien 1a oder 1b befindet.

Zwischen den Szenarien kann keine Priorisierung vorgenommen werden, da es sich um denselben Use Case nur in verschiedenen Kooperationsstufen handelt. Im Gegensatz zu anderen Funktionen können die Szenarien gleichzeitig stattfinden (Szenario 1a und Szenario 1b) oder sich ein Szenario direkt aus einem vorhergehenden ergeben (Übergang von Szenario 1a und 1b zu 1c). Allen Szenarien gemeinsam ist dass der Abstandsregler des Fahrzeugs durch Kooperation optimiert wird.

2.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung

In Funktion 2 werden permanent Informationen von der Verkehrsinfrastruktur sowie von vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugen empfangen. Die Informationen aus der Verkehrsinfrastruktur werden genutzt, um eine situative Abstandsregelung zu ermöglichen. Die Funktion wird aktiv, wenn die Verkehrslage oder Ereignisse wie ein Unfall eine Reduzierung der Geschwindigkeit sowie eine Vergrößerung des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug erfordern. Dabei werden hauptsächlich Situationen betrachtet, die sich im Bereich von 100-1000 m vor dem Fahrzeug befinden.

Darüber hinaus kann die Funktion direkt den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug regeln. Dazu werden die von diesem Fahrzeug empfangenen Informationen wie Position und Geschwindigkeit in das Umfeldmodell integriert. Anhand des fusionierten Umfeldmodells, das empfangene Daten aus der Kommunikation sowie Informationen der fahrzeugeigenen Sensorik enthält, kann der Abstand zum Vorderfahrzeug geregelt werden. Dabei werden die normalen Abstände eines konventionellen Abstandsreglers verwendet, d.h. die Lücke zum Folgefahrzeug bewegt sich zwischen einer und zwei Sekunden.

Eine besondere Situation tritt auf, wenn ein Fahrzeug mit Einscherwunsch erkannt wird. Die Erkennung kann auf verschiedene Weise erfolgen, z.B. durch die Fahrtrichtungsanzeigerinformationen in V2X-Nachrichten. In diesem Fall kann der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug so vergrößert werden, dass das andere Fahrzeug einscheren kann. Dazu muss eine Lücke geöffnet werden, bei der beide Fahrzeuge, d.h. Einscherer und Ego-Fahrzeug, den Abstand ihrer üblichen

Folgezeitlücken einhalten können. Da sich die Funktion 1 ebenfalls mit Einscherern beschäftigt, kann es hier eine Beziehung zu dieser Funktion geben.

Kollaboratives Staufolgefahren wird ermöglicht, wenn sich das Ego-Fahrzeug und weitere Fahrzeuge innerhalb eines Staus befinden oder sich auf einen Stau zubewegen und die Geschwindigkeit bereits reduziert wurde, um das Ende des Staus sicher zu erreichen. Die Funktion ist nur auf Autobahnen oder auf autobahnähnlichen Schnellstraßen aktiviert.

Die Erkennung eines Staus kann durch das Ego-Fahrzeug oder durch andere Fahrzeuge im Stau erfolgen. Außerdem können Stauinformationen von der Infrastruktur empfangen werden. Für die Erkennung eines Staus können empfangene CAM-Nachrichten von anderen Fahrzeugen genutzt werden. Eine übliche Vorgehensweise ist, den Verlustweg gegenüber der erlaubten oder durchschnittlichen Geschwindigkeit auf einer Strecke zu ermitteln und die Informationen von mehreren Fahrzeugen zu aggregieren. Andere Möglichkeiten zur Stauerkennung, auch durch die fahrzeugeigene Sensorik, sind denkbar.

Für die Funktion wird Kommunikation basierend auf ITS-G5 und Mobilfunk genutzt. Dies soll dazu dienen, mit Verkehrsteilnehmern und Verkehrsinfrastruktur zu kommunizieren. Der Planungshorizont für die Manöver ist räumlich beschränkt, z.B. durch die Kommunikationsreichweite.

Befinden sich mehrere Fahrzeuge, die die Funktion unterstützen, innerhalb eines bestimmten Sektors im Stau oder unmittelbar hinter dem Stau, und die Geschwindigkeit ist bereits auf unter 60 km/h gefallen, so kann eine Staufolgekolonne innerhalb des Planungshorizonts initiiert werden. Die Fahrzeuge handeln dann die Reihenfolge in der Kolonne aus. Danach können die Fahrzeuge ihre Manöver auf Basis des Manövers des vordersten Fahrzeugs planen. Die Längsregelung passt sich dabei an das vorderste Fahrzeug an. Es wird angenommen, dass Wunschengeschwindigkeiten einer Kolonne nicht höher als 60 km/h liegen. Es ist dabei möglich, dass die Kolonne diese Geschwindigkeit für kurze Zeit überschreitet, um häufiges Auflösen und Aufbauen einer Kolonne zu vermeiden. Fährt die Kolonne schneller als 90 km/h oder länger als eine Minute schneller als 60 km/h wird die Kolonne aufgelöst. Das gilt auch, wenn das Ende der Stausituation auf andere Weise erkannt wird, z.B. über Nachrichten von anderen Fahrzeugen oder von der Verkehrsinfrastruktur. Die Fahrzeuge vergrößern dann ihren Abstand wieder und jedes Fahrzeug übernimmt die Längsregelung einzeln.

Ausprägung	Beschreibung
Use Case-Beteiligte	Ego, umgebender Verkehr, Verkehrsinfrastruktur, mittelbar vorausfahrendes Fahrzeug, unmittelbar vorausfahrendes Fahrzeug
Kurzbeschreibung	Situative und direkte Anpassung der Abstandsregelung sowie Anpassung der Abstandsregelung in einer Staufolgekolonne
Kooperative Manöver	Anpassung der Abstandsregelung mit kollektiver Perzeption, Staufolgekolonne mit verringertem Abstand
Mögliche Störungen	Ausfall der Kommunikation, widersprüchliche/inkonsistente Umfeldinformationen, Fehler bei der Lokalisierung, kein direkt Vorausfahrender mit IKS >2 erkennbar, Regelgröße(n) des Vorfahrers nicht ok, Einscherer < IKS 3, keine Staukolonne möglich, Fahrer übersteuert, dritte Fahrzeuge stören das Manöver/zerstören die Lücke, Fahrzeug stimmt Manöveraflösung nicht zu
Kooperationsstufe	Szenario 1a: IKS 0-2 / Szenario 1b: IKS 0-3 / Szenario 1c: IKS 4-5
Zeitlicher und räumlicher Ablauf	Szenario 1a: Hauptsächlich 100-1000 m vor dem Fahrzeug Szenario 1b: Perzeptionsbereich der Fahrzeugsensorik Szenario 1c: Stauerkennung auch außerhalb des Bereichs der Fahrzeugsensorik, aktiv bei Geschwindigkeit < 60 km/h, Verringerung des Abstands innerhalb des Bereichs der Fahrzeugsensorik

Tabelle 2.1: Detaillierung der Funktion F2

2.2 Funktionszerlegung

Die Funktion F2 betrachtet fünf verschiedene Akteure, deren Interaktion in Abbildung 2.4 dargestellt ist. Das ist einerseits das eigene Fahrzeug, das an den Szenarien „Regelung situativ optimieren“, „Regelung direkt optimieren“ und „Kolonnenfahrt“ teilnehmen kann. Für die Kolonne sowie die direkte Optimierung wird außerdem das direkt vorausfahrende Fahrzeug einbezogen. Im Gegensatz dazu werden für die situative Optimierung auch Daten von der Verkehrsinfrastruktur sowie von mittelbar vorausfahrenden Fahrzeugen mit einbezogen.

Im Nachfolgenden wird die Funktion in mehrere Abschnitte zerlegt und aus Fahrer- sowie Fahrzeugsicht beschrieben. Aus Verständnisgründen ist Phase 2 (Anpassung der Regelung) in zwei Teilphasen unterteilt (situative und direkte Optimierung der Regelung).

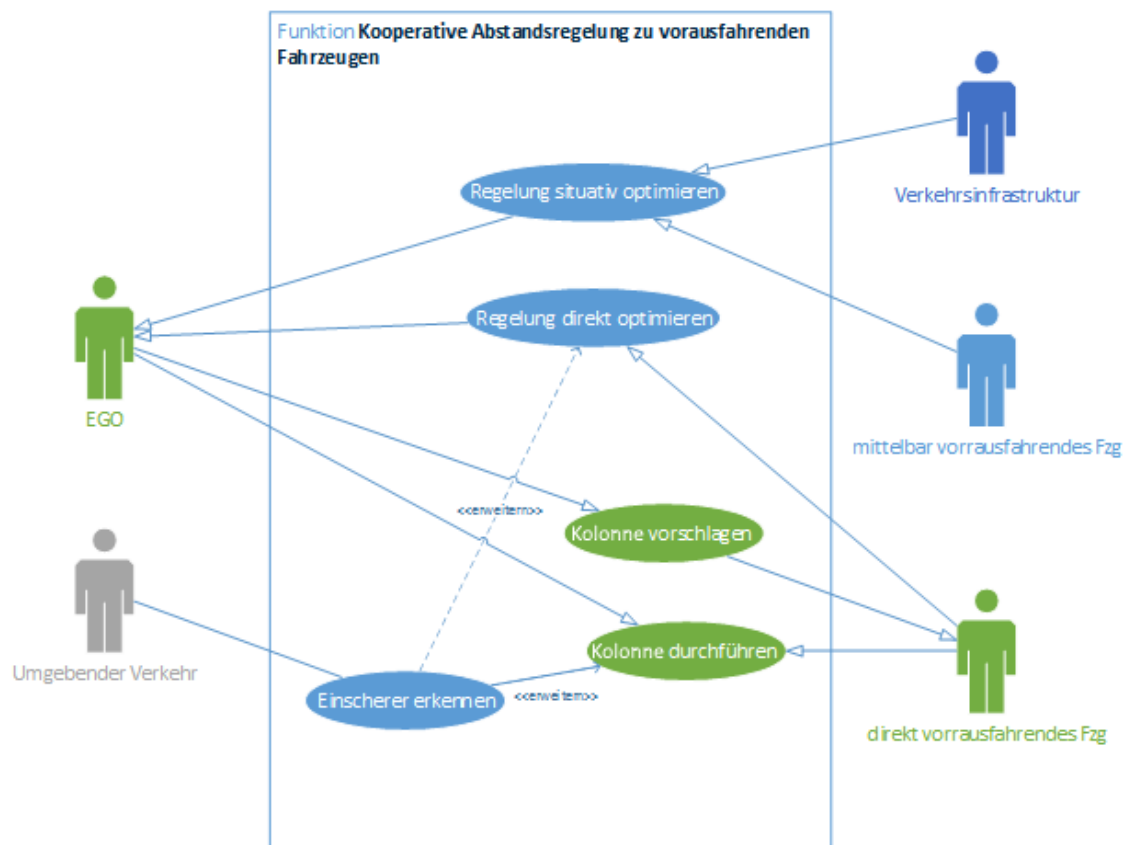


Abbildung 2.4: Big Picture der Funktion F2 „Kooperative Längsführung auf Autobahnen“

2.2.1 Fahrersicht

Aus Perspektive des Fahrers lassen sich die beschriebenen Use Cases genauer spezifizieren. Hierbei wird ein störungsfreier Ablauf aus Sicht des Ego-Fahrers sowie aus Sicht der vorausfahrenden Fahrer betrachtet. Die Betrachtung erfolgt für die Fahrt mit ACC (Automatisierungs-Level 1).

In den Phasen 1 und 2 wird die IMAGinE-Kooperationsstufe 2 bzw. 3 (IKS 2/3) und in den Phasen 3 und 4 (Staukolonne) die IMAGinE-Kooperationsstufe 4 und 5 (IKS 4/5) betrachtet. Die Phase 1 „Sensierung & Umfeldmodellierung“ ist der erste Schritt in der Funktion, in dem Informationen von anderen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur empfangen und in das Umfeldmodell integriert werden. Die Phase 2 beschreibt die direkte und situative Anpassung der Abstandsregelung basierend auf diesen Daten. Dabei wird die Längsregelung optimiert. Bei der situativen Anpassung werden hauptsächlich Informationen außerhalb des Perzeptionsbereichs der Fahrzeugsensorik verwendet, bei der direkten Anpassung Informationen vom unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug.

Die Phasen 3 und 4 beschreiben eine erweiterte Anpassung der Längsregelung innerhalb einer Staufolgekolonne. Diese Phasen können nur auftreten, wenn sich das Fahrzeug in einem Stau befindet, bzw. unmittelbar davor. In Phase 3 wird die Kolonne aufgebaut, in Phase 4 wird die Kolonnenfahrt durchgeführt und gegebenenfalls aufgelöst.

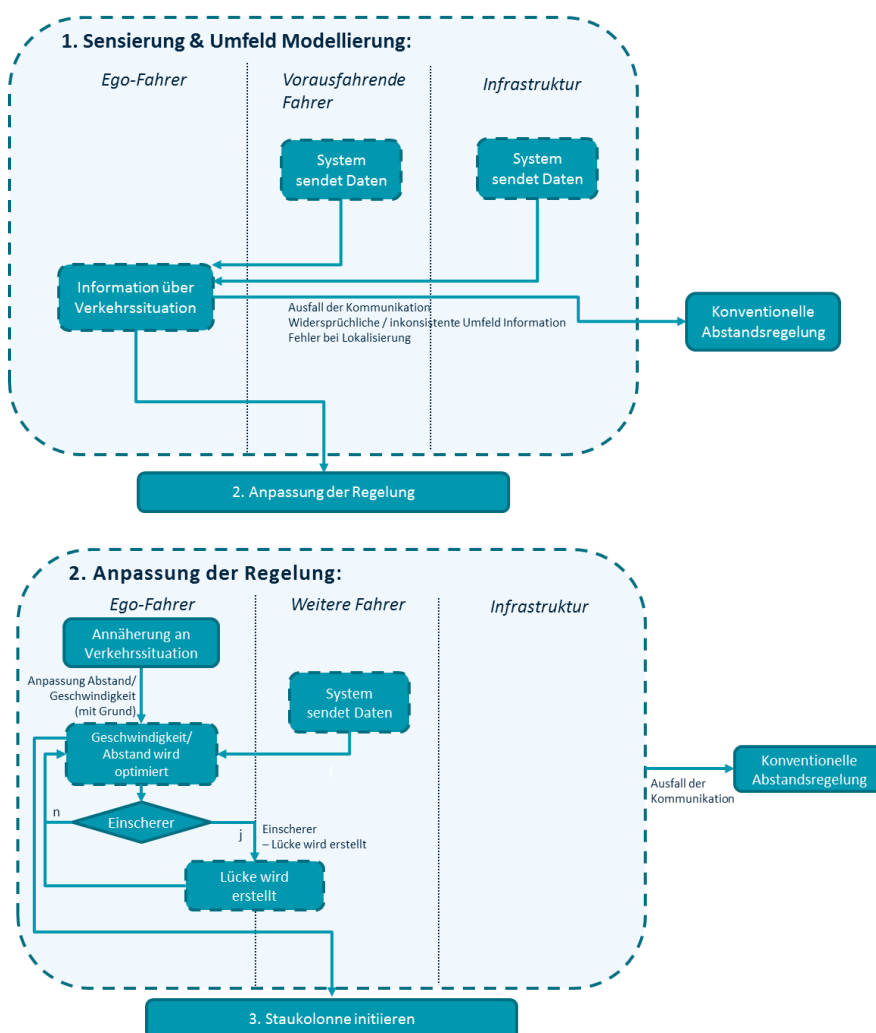
Sensierung & Umfeld- modellierung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Vorfahrende Fahrer/ Infrastruktur
Wer	Der Fahrer wird ggf. über die Verkehrssituation informiert.	Fahrzeuge/ Infrastruktur übermitteln ihr Wissen über Geschwindigkeiten und die Verkehrslage an den Fahrer.
Wann		
Was		
Wie		
Wie lange		
Wo		
Abbruch- varianten	• Ausfall der Kommunikation • Keine Kooperation möglich (div. Gründe)	

Anpassung der Regelung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Weitere Fahrer
Wer	Der Fahrer nähert sich einer bestimmten Verkehrssituation. Das System teilt dem Fahrer eine Geschwindigkeits-/ Abstandsoptimierung mit („Geschwindigkeit wird angepasst“). Wird ein Einscherer erkannt („Einscherer erkannt“), erstellt das System eine Lücke („Lücke wird erstellt“). Daraufhin erfolgt wieder eine Geschwindigkeits-/ Abstandsoptimierung.	System sendet Daten.
Wann		
Was		
Wie		
Wie lange		
Wo		
Abbruch- varianten	• Kommunikationsausfall	

Manöver- planung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Weitere Fahrer
Wer	Kooperationsanfrage wird an benachbarte Fahrzeuge gesendet („Platoonanfrage versendet“). Die Systeme planen das Manöver. Fahrer empfängt die Kooperationsbestätigung („Platoonbildung bestätigt“).	Empfangen der Kooperationsanfrage („Platoonbildung?“) und senden einer Kooperationsbestätigung („Platoonbildung bestätigt“). Die Systeme planen das Manöver.
Wann		
Was		
Wie		
Wie lange		
Wo		
Abbruch- varianten	• Ausfall der Kommunikation • Keine Staukolonne möglich (div. Gründe)	

Manöver- durchführung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Weitere Fahrer
Wer	Das Fahrzeug reduziert den Abstand („<i>Abstand wird reduziert</i>“) und passt Beschleunigung und Geschwindigkeit („<i>Platoon wird durchgeführt</i>“) an vorderstes Fahrzeug an. Wird ein Einscherer erkannt („<i>Einscherer erkannt</i>“), erstellen die Systeme eine Lücke („<i>Lücke wird erstellt</i>“). Wird ein Stauende erkannt, wird Auflösen des Platoons vorgeschlagen („<i>Stauende – Platoon auflösen?</i>“). Bei Zustimmung wird das Platoon aufgelöst und Abstand vergrößert („<i>Platoon wird aufgelöst</i>“).	Das Fahrzeug reduziert den Abstand („<i>Abstand wird reduziert</i>“) und passt Beschleunigung und Geschwindigkeit („<i>Platoon wird durchgeführt</i>“) an vorderstes Fahrzeug an. Wird ein Einscherer erkannt („<i>Einscherer erkannt</i>“), erstellen die Systeme eine Lücke („<i>Lücke wird erstellt</i>“). Wenn ein Auflösewunsch empfangen wird („<i>Platoon auflösen?</i>“), wird bei Zustimmung der Abstand vergrößert und das Platoon aufgelöst („<i>Platoon aufgelöst</i>“).
Wann		
Was		
Wie		
Wie lange		
Wo		
Abbruch- varianten	• Ausfall der Kommunikation • Fahrer übersteuert • Dritte Fzg. stören das Manöver/zerstören die Lücke • Fahrzeug stimmt Manöverauflösung nicht zu	

Tabelle 2.2: Basic Flow in den einzelnen Phasen der Funktion F2 aus Fahrersicht



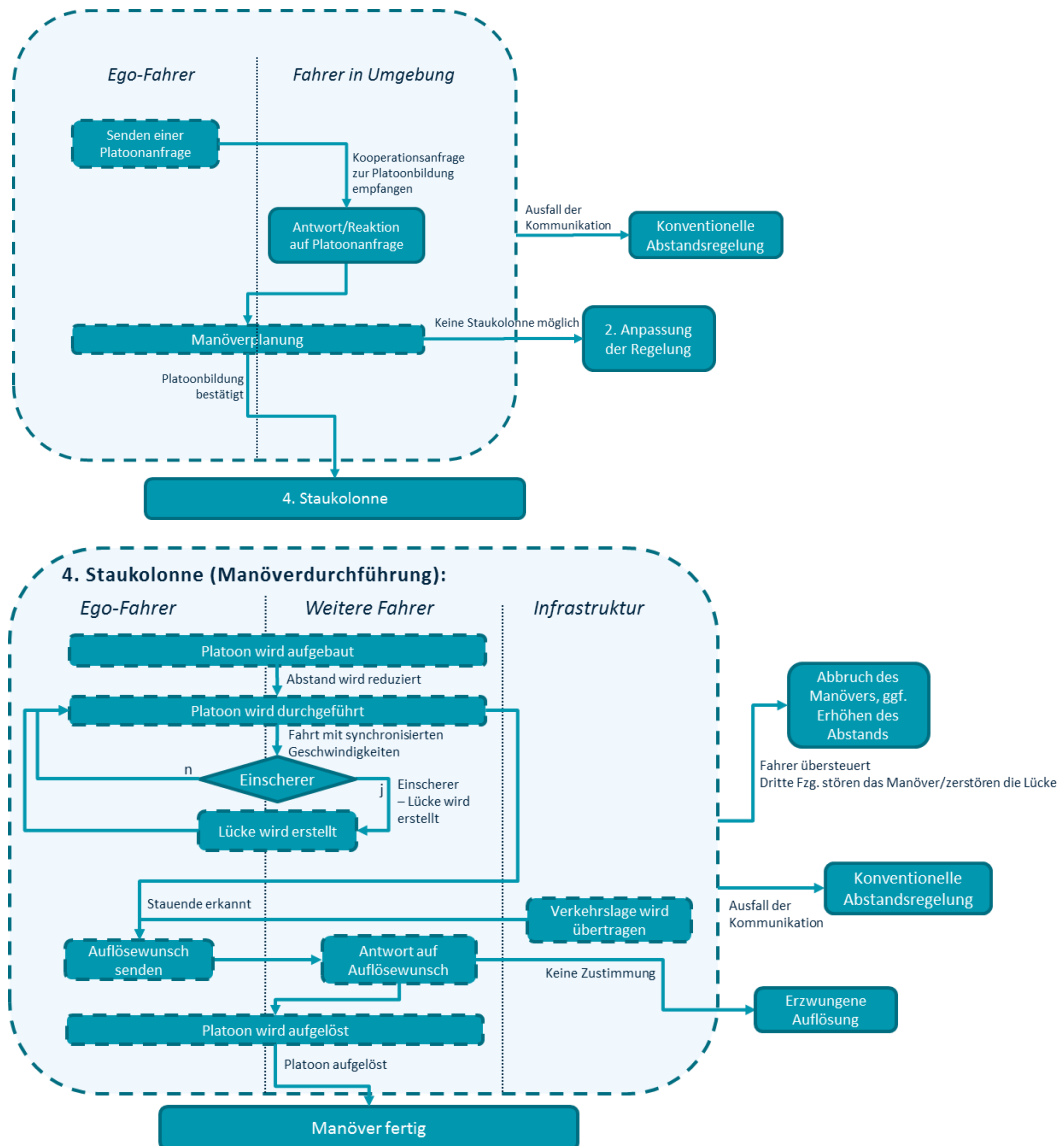


Abbildung 2.5: Interaktionsdiagramme der einzelnen Phasen der Funktion F2 aus Fahrersicht

Aus den Tabellen und Diagrammen aus Fahrersicht ergeben sich die folgenden Fragen zur MMI-Gestaltung (keine vollständige Liste):

- Muss die Funktion aktiviert werden oder ist sie immer im Hintergrund aktiv?
- Möchte der Fahrer informiert werden, wenn die Längsregelung auf Situationen regelt, die vom Fahrer (noch) nicht direkt wahrgenommen werden können? Wie sollte eine solche Information aussehen? Wann ist der passende Zeitpunkt für diese Information?
- Benötigt der Fahrer hinter dem Ego-Fahrzeug (d.h. der rückwärtige Verkehr) Informationen?
- Wird das Senden einer Kooperationsanfrage zur Kolonnenbildung vom System oder Fahrer initiiert?

- Erfolgt die Antwort/Reaktion auf die Kooperationsanfrage zur Kolonnenbildung vom System oder Fahrer? Wenn vom Fahrer, wie?
- Muss der kooperationsbedürftige Fahrer ein abgestimmtes Manöver bestätigen?
- Muss der kooperationsgewährende Fahrer ein abgestimmtes Manöver nochmal explizit bestätigen, d.h. ausdrücklich zustimmen, dass das Fahrzeug hinter ihm dichter auffahren darf? Oder erfolgt dies automatisch mit Aktivierung des Assistenten?
- Welche Information wird beim Kolonnenaufbau benötigt (Kolonne wird aufgebaut vs. Abstand wird reduziert)?
- Welche Informationen benötigt der Fahrer während dem Fahren in der Staufolgekolonne?
- Wird ein Auflösewunsch vom Fahrer oder vom System vorgeschlagen?
- Wird ein Auflösewunsch vom System beantwortet oder von Fahrer bestätigt?
- Welche Information wird beim Auflösen der Kolonne benötigt (Abstand wird vergrößert vs. Kolonne wird aufgelöst vs. beides)?
- Welche Informationen benötigt der Fahrer im Falle einer Störung während des Fahrens in einer Staufolgekolonne?

2.2.2 Fahrzeugsicht

Aus Sicht des Ego-Fahrzeugs erfolgt in Szenario 1a eine Interaktion mit der Verkehrsinfrastruktur und mittelbar vorrausfahrenden Fahrzeugen (also Fahrzeugen in direkter Umgebung), die Informationen über Verkehrseignisse wie Staus, Unfälle und Baustellen übermitteln, um die Regelung situativ zu optimieren. Dies äußert sich z.B. in einer langsamen Erhöhung des Abstands zum vorrausfahrenden Fahrzeug bei Erkennung einer Baustelle oder einer deutlichen Verlangsamung mit gleichzeitiger Warnung des Fahrers bei Erkennung einer Unfallsituation.

Sofern das direkt vorausfahrende Fahrzeug über eine Kommunikation nach IKS 2 oder 3 verfügt, können die übermittelten Telemetriedaten direkt im Längsregler verarbeitet werden und so eine optimierte Anpassung von Geschwindigkeit und Beschleunigung an das vorausfahrende Fahrzeug ermöglichen. Dies ist für den Fahrer überwiegend transparent, kann aber informativ angezeigt werden.

Wenn die Voraussetzungen für eine Stau-Kolonne erfüllt sind, können das Ego-Fahrzeug und andere in der Kolonne befindlichen Fahrzeuge eine Absprache über das durchzuführende Manöver mit IKS 4 und 5 durchführen.

Weiterhin wird der umgebende Verkehr beachtet. Dies erfolgt speziell zur frühzeitigen Erkennung von möglichen Einscherern über die Übermittlung des Fahrtrichtungsanzeigers mittels IKS 2. In diesem Fall kann der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug angepasst werden, um einen sicheren Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen und Gefahrensituationen zu vermeiden.

Aus den Szenarien 1a-1c ergeben sich die folgenden Phasen.

1. Sensierung & Umfeldmodellierung

EGO	Voraus fahrende Fahrzeuge	Strategischer Support
1.1 Eigene Sensordaten abrufen (Input: Umfeldsensorik + CAN des Ego-Fahrzeugs)		
	1.2 Telemetrie übertragen (Output: CAM, kooperative Perzeption) <i>Fahrzeugdaten, kooperative Perzeptionsdaten</i>	1.3 Verkehrslage übertragen <i>Infrastrukturdaten</i>
1.4 Fahrzeuginformationen von situationsrelevanten Fahrzeugen empfangen (Input: CAM/DENM, kooperative Perzeption) Fahrzeugdaten, kooperative Perzeptionsdaten		
1.5 Umfeldmodell durch empfangene Informationen erweitern, Verkehrssituation analysieren		

Tabelle 2.3: Basic Flow zur Phase „Sensierung & Umfeldmodellierung“ der Funktion F2

Störungen	Alternativen	Folgen
S1.1 Ausfall der Kommunikation	ggf. Definition in TP2	Eingeschränkte Abstandsregelung
S1.2 Widersprüchliche / inkonsistente Umfeldinformationen	A1.1 Situationsbewertung der Fahrzeuge differenziert	Keine Kooperation möglich. Funktion nicht verfügbar.
S1.3 Fehler bei Lokalisierung (GNSS oder Karte)	A1.2 Situationsbewertung der Fahrzeuge differenziert	Keine Kooperation möglich. Funktion nicht verfügbar.

Tabelle 2.4: Störungen und Alternativen für Phase „Sensierung & Umfeldmodellierung“ der Funktion F2

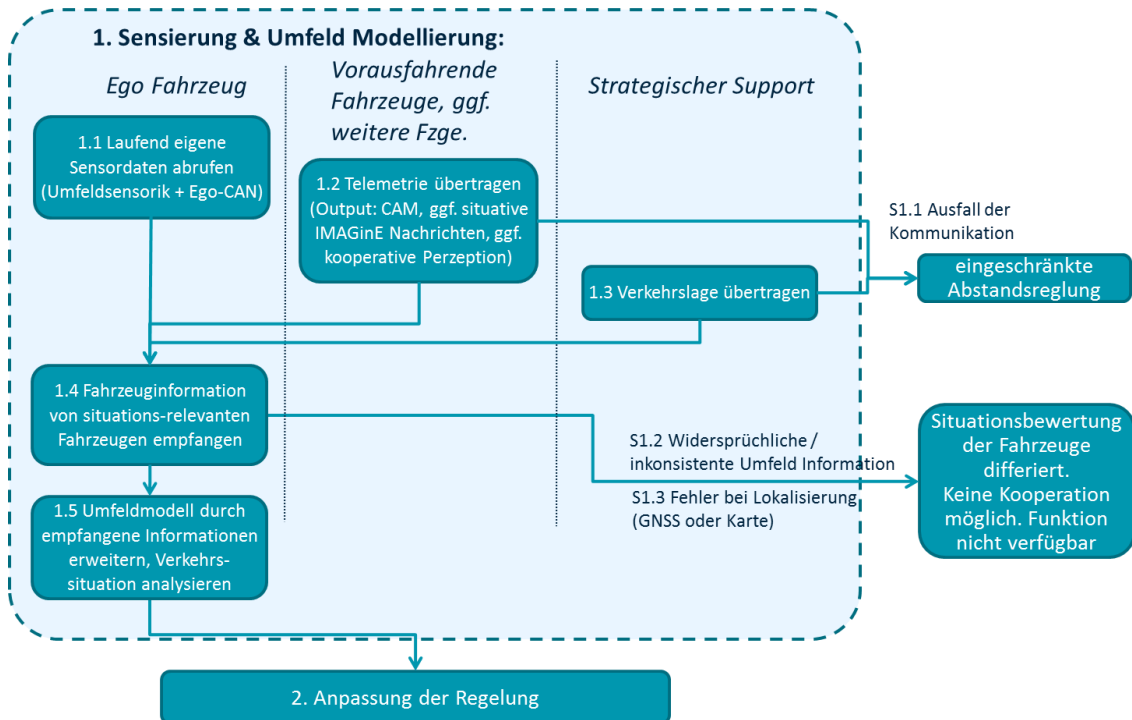


Abbildung 2.6: Interaktionsdiagramm auf Fahrzeugsicht in Phase „Sensierung & Umfeldmodellierung“ der Funktion F2

2. Anpassung der Regelung

EGO	Direkt vorausfahrende & andere Fahrzeuge	Strategischer Support
2.1 Geschwindigkeits-abweichung und Verzögerung sowie Verkehrsergebnisse stromaufwärts erkennen		
2.2 Reaktion planen, z.B. Übergangstrajektorie berechnen		
2.3 Regelung situativ anpassen, z.B. Geschwindigkeitssollwert des Abstandsreglers optimieren		

Tabelle 2.5: Basic Flow zur Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1a)

Störungen	Alternativen	Folgen
S2.1 Keine Abweichungen oder Ereignisse erkennbar	A2.1 Funktion nicht verfügbar	Konventionelle Abstandsregelung

Tabelle 2.6: Störung und Alternativen für Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1a)

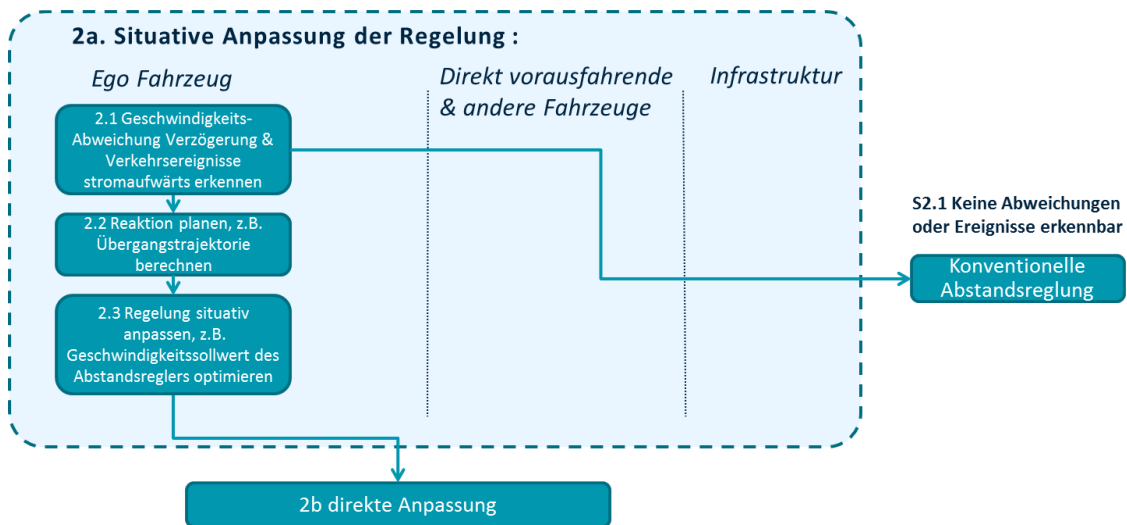


Abbildung 2.7: Situative „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1a)

EGO	Direkt vorausfahrende & andere Fahrzeuge	Infrastruktur
2.5 Direkte Vorausfahrer IKS>2 für Folgefahrt erkennen	2.4 CAM + situative IMAGinE Nachrichten senden: <i>Fahrzeugdaten, kooperative Perzeptionsdaten</i>	
2.6 Regelgrößen des Vorfahrers extrahieren (Geschwindigkeit, Zielfahrzeugabstand) <i>Fahrzeugdaten, kooperative Perzeptionsdaten</i>		
2.7 Plausibilisierung und Fusion der Sollwerte, Abstandsregler direkt optimieren		
2.8 Einscherer in Folgefahrt erkennen		
2.9 Lücke für Einscherer: Abbremsen mit Beachtung des Nachfolgenden		

Tabelle 2.7: Basic Flow zur Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1b)

Störungen	Alternativen	Folgen
S2.2 Kein direkt Vorausfahrender mit IKS >2 erkennbar	A2.2 Koop. Folgefahren nicht möglich, da der Vorausfahrende nicht ausreichend kooperieren kann, keine direkte Optimierung	Situative Abstandsreglung
S2.3 Regelgröße(n) des Vorfahrers nicht ok	A2.3 Koop. Folgefahren nicht möglich, da die Daten des Vorausfahrenden nicht nutzbar sind, keine direkte Optimierung	Situative Abstandsreglung
S2.4 Einscherer < IKS 3	A2.4 Koop. Folgefahren nicht möglich, da der eingescherte Vorausfahrende nicht ausreichend kooperieren kann, keine direkte Optimierung	Situative Abstandsreglung

Tabelle 2.8: Störung und Alternativen für Phase „Anpassung der Regelung“ (Szenario 1b)

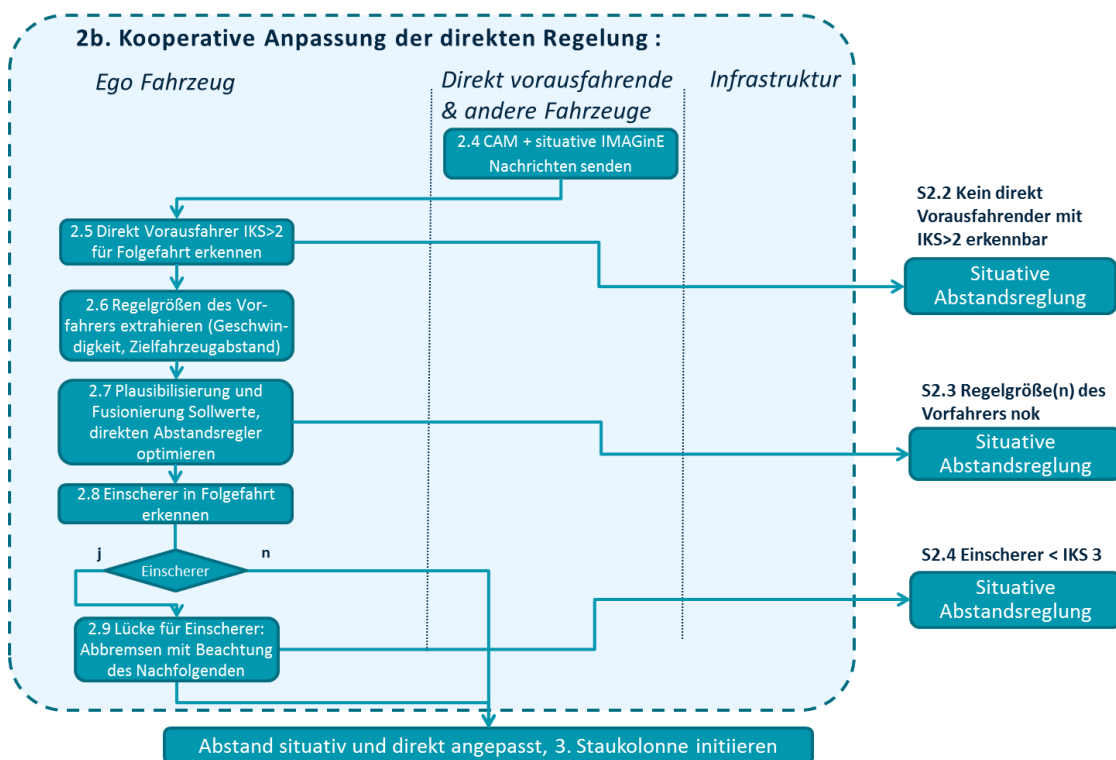


Abbildung 2.8: Kooperative Anpassung der direkten Regelung/Folgefahrt (Szenario 1b)

3. Manöver planen (Teil 1 „Kooperationsanfrage“)

EGO	Vorausfahrende oder nachfolgende Fahrzeuge	Infrastruktur
3.1 Kooperationsanfrage an benachbarte Fahrzeuge stellen (auch vom vordersten Fahrzeug möglich) <i>Manöverdaten</i>	3.2 Kooperationsanfrage empfangen <i>Manöverdaten</i>	
	3.3 Wahrscheinliche Manöver berechnen, bewerten, ob diese Manöver aktuell unterstützt werden könnten	
3.5 Kooperationsbestätigung von Fahrzeugen empfangen <i>Manöverdaten</i>	3.4 Mit Akzeptanz oder Ablehnung zur Kooperation antworten <i>Manöverdaten</i>	
3.6 Manöver planen		
3.7 Manöverplan ⁹ den ausgewählte(n) Fahrzeug(en) mitteilen <i>Manöverdaten</i>	3.8 Manöverplan von Ego empfangen <i>Manöverdaten</i>	
	3.9 Bewerten, ob dieses Manöver aktuell unterstützt werden kann	
	3.10 Manöverbestätigung oder -ablehnung an Ego senden <i>Manöverdaten</i>	

Tabelle 2.9: Basic Flow zur Phase „Manöverplanung“ (Teil 1 „Kooperationsanfrage“)

Störungen	Alternativen	Folgen
S3.1 Ausfall der Kommunikation	A3.1 Funktion nicht verfügbar	Konventionelle Abstandsregelung
S3.2 Keine Staukolonne möglich	A3.2 Koop. Folgefahren nicht möglich	Direkt optimierte Abstandsregelung

Tabelle 2.10: Störungen und Alternativen für Phase „Manöverplanung“ (Teil 1 „Kooperationsanfrage“)

⁹ Manöverpläne enthalten nicht zwingend Trajektorien. Zu Manöverplan siehe auch Glossar D1.2.

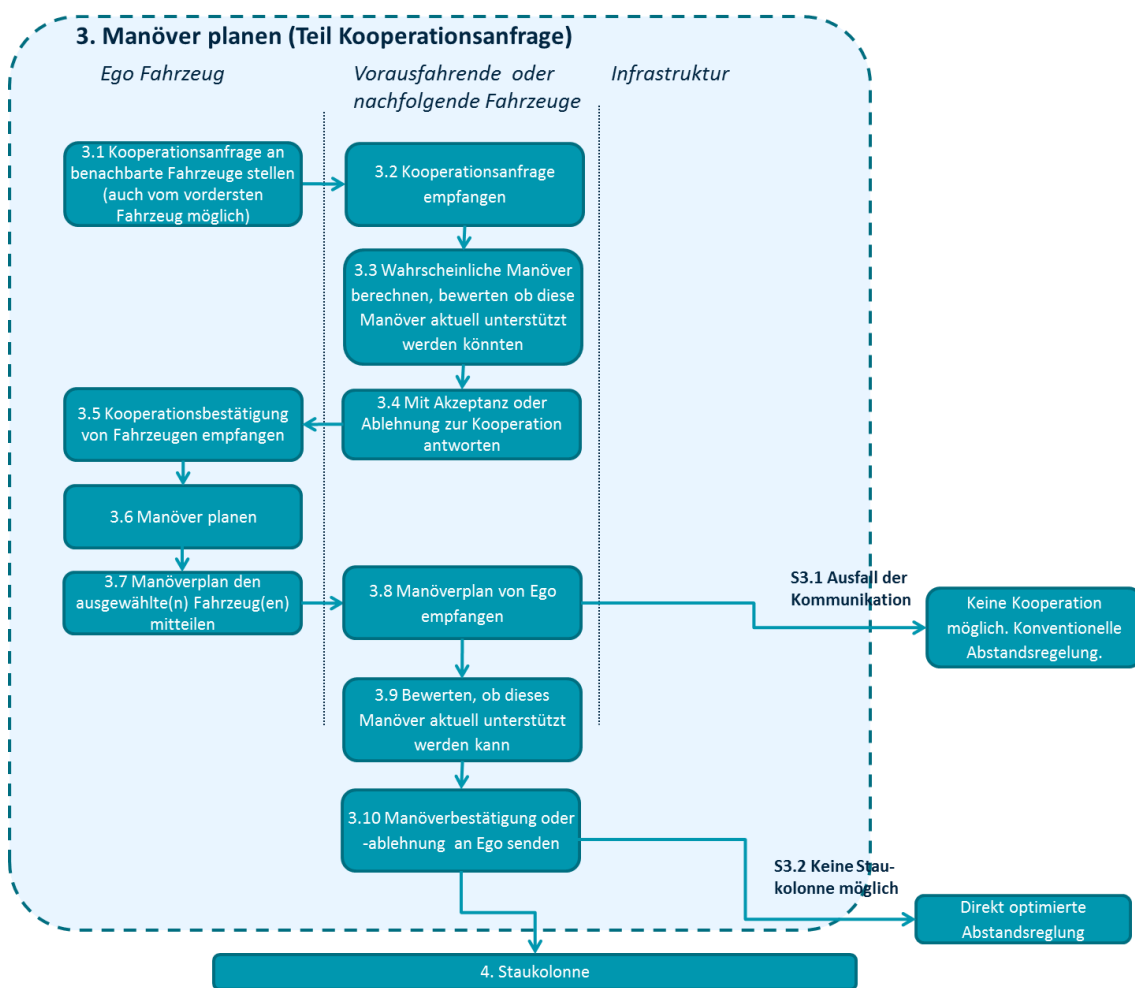


Abbildung 2.9: Manöver planen (Teil 1 „Kooperationsanfrage“)

4. Manöverdurchführung

Die Manöverdurchführung wird am komplexen Szenario 1c der Staukolonne erläutert. Für die Szenarien 1a und 1b ist sie entsprechend einfacher und nicht benötigte Schritte entfallen.

EGO	Direkt vorausfahrende & andere Fahrzeuge	Infrastruktur
4.1 Abstand langsam reduzieren, Beschleunigung und Geschwindigkeit an vorderstes Fahrzeug anpassen		
4.2 Kontinuierlich Geschwindigkeit/Beschleunigung übertragen		
4.3 Beschleunigung und Geschwindigkeit mit Vorderfahrzeugen synchronisieren		
4.4 Lücke für Einscherer:		

EGO	Direkt vorausfahrende & andere Fahrzeuge	Infrastruktur
Abbremsen mit Beachtung des Nachfolgenden + Benachrichtigung über Einscherer (eigene Sensordaten) an Nachfolgende		
4.5 Verkehrssituation überprüfen, speziell Fortbestehen der Stausituation analysieren		4.6 Verkehrslage übertragen
4.7 Stauende erkennen		
4.8 Auflösung des Manöver vorschlagen <i>Manöverdaten</i>	4.9 Auflösewunsch empfangen, analysieren und beantworten <i>Manöverdaten</i>	
4.10 Abstand langsam vergrößern bis auf Normalabstand, situative und direkte Abstandsregelung		
4.11 Manöver auflösen		

Tabelle 2.11: Basic Flow zur Phase „Manöverplanung“ (Teil 2 „Manöverauswahl“)

Störungen	Alternativen	Folgen
S4.1 Ausfall der Kommunikation	A4.1 Funktion nicht verfügbar	Konventionelle Abstandsregelung
S4.2 Fahrer übersteuert	A4.2 Manöver wird abgebrochen	Abbruch des laufenden Manövers. Ggf. erhöhen des Abstands
S4.3 Dritte Fahrzeuge stören das Manöver/zerstören die Lücke	A4.3 Manöver kann nicht mehr wie abgestimmt durchgeführt werden	Abbruch des laufenden Manövers. Ggf. erhöhen des Abstands
S4.4 Fahrzeug stimmt Manöverauflösung nicht zu	A4.4 Initiator tritt aus Kolonne aus	Kolonne löst sich gezwungen auf

Tabelle 2.12: Störungen und Alternativen für Phase „Manöverplanung“ (Teil 2 „Manöverauswahl“)

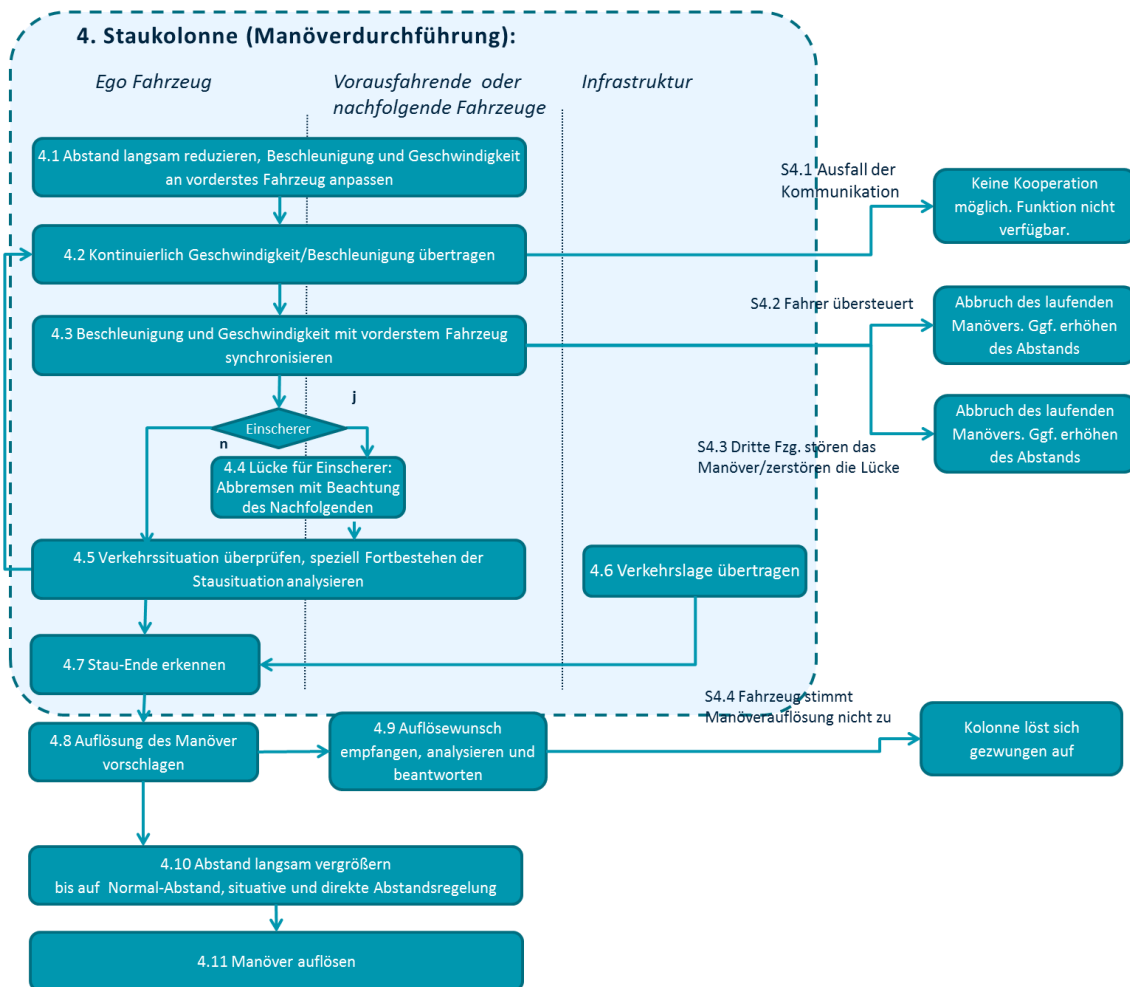


Abbildung 2.10: Manöver planen (Teil 2 „Manöverauswahl“)

2.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der Literaturanalyse sowie der sich daraus ergebenden Implikationen für das MMI gegeben.

Optimierung der Längsregelung

Fahrer schätzen aufgrund der aktuellen Informationen aus der Verkehrssituation und dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, wie sich die Verkehrssituation voraussichtlich verändern wird (Klebensberg, 1982). Entsprechend dieser Erwartungen wird das eigene Verhalten an die erwarteten Bedingungen angepasst bzw. eine entsprechende Längsregelung eines automatisierten Systems erwartet.

Eine Vielzahl von Studien konnte zeigen, dass eine frühzeitige Information des Fahrers über vorausliegende Gefahrenstellen nicht nur das Fahrverhalten ändert (z.B. Reduktion der Fahrgeschwindigkeit) und zu geringeren Reaktionszeiten und erhöhter Sicherheit führt, sondern von den Fahrern auch akzeptiert wird (Buld et al., 2010 [1] [2] [3] [4] [5]).

Falls eine optimierte Längsregelung die Geschwindigkeit und den Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen eigenständig regelt und auf situative Aspekte (z.B. ein Stauende) reagieren kann, wird keine Reaktion des menschlichen Fahrers benötigt. Daher besteht aus MMI-Sicht keine Notwendigkeit, den Fahrer vor entsprechenden Situationen zu warnen. Dennoch sollte der Fahrer über die erkannte Situation (z.B. Stauende) und das geplante Verhalten der optimierten Längsregelung informiert werden. Dies ist insbesondere deshalb wichtig, da der Fahrer die Ursache für die optimierte Längsregelung nicht direkt wahrnehmen kann und diese als fehlerhaft missverstehen könnte. Weiterhin ist es denkbar, dass bis zum Erreichen der Gefahrenstelle das Regelsystem ausgeschaltet wird (durch den Fahrer oder aufgrund einer Störung). Auch aus diesem Grund sollte der Fahrer über vorausliegende und potentielle Gefahrenstellen informiert werden. Das gleiche gilt für die Erkennung von Einscherern.

Eine direkte Optimierung der Längsregelung im Rahmen einer direkten Folgefahrt mit V2V-Kommunikation erfordert (im Gegensatz zur situativen Optimierung) keine weiteren Anpassungen des MMI, da alle relevanten Einflussgrößen auf die Längsregelung auch vom Fahrer wahrgenommen werden können.

Einige Fragen bzgl. der MMI-Gestaltung bei situativer Optimierung der Längsregelung bedürfen einer (möglicherweise empirischen) Überprüfung:

- Sollten bei aktiviertem ACC die Informationen über vorausliegende Situationen (z.B. ein Stauende) ebenso frühzeitig angezeigt werden wie bei ausgeschaltetem ACC?
- Wie reagiert der Fahrer auf eine angezeigte Warnung, auf die das ACC noch nicht reagiert, weil die Gefahrenstelle noch einige Kilometer entfernt ist?

Kooperatives Staufolgefahren

Eine Fahrzeugkolonne ist definiert als eine Reihe direkt hintereinander fahrender Fahrzeuge. Das Gefährdungspotential von Abständen zwischen ein und drei Metern wird reguliert, indem jedes Fahrzeug der Kolonne die Fahrdynamik seines vorausfahrenden Fahrzeugs kennt (Lee & Wang, 2007). Des Weiteren werden Informationen über Fahrtbedingungen und Manöver durch den Kolonnen-Head weitergegeben (Dávila & Nombela, 2010).

Michaud (2006) und Gaubert (2003) stellen die Modi und die damit verbunden Verhaltensweisen eines kolonnenfähigen Fahrzeugs in einer Finite-State-Machine dar und unterscheiden folgende Zustände:

- Suchen einer Kolonne
- Beitritt zu einer Kolonne
- Fahren in einer Kolonne
- Verlassen einer Kolonne
- Auflösen der Kolonne / Notfall
- Einscherer-Erkennung

Die zentralen Ziele eines MMIs für die Kolonnenfahrt sind die Aufrechterhaltung der Situation Awareness des Fahrers sowie die Unterstützung des Fahrers bei den genannten Manövern und Transitionen. Untersuchungen, die sich auf Kolonnen außerhalb eines Staus beziehen, haben dabei festgestellt, dass 95% der Teilnehmer es für unabdingbar halten, vor einem Manöver der Kolonne informiert zu werden, und 86% ein Manöver vor Ausführung zunächst bestätigen möchten (Laburu, 2010).

Demnach sollten folgende Informationen im MMI dargestellt werden:

- Kolonnenaufbau durch Zusammenschluss von zwei Fahrzeugen: Zwei direkt benachbarte und ausgerüstete Fahrzeuge erkennen eine potentielle Kolonnensituation. Sobald beide Fahrzeuge hintereinander fahren und beide Fahrer der Kolonnenbildung zugestimmt haben, wird diese bestätigt und das Kolonnenmanöver gestartet.
 - Information des Fahrers über potentielle Kolonnensituation
 - Anfrage zur Kolonnenbildung
 - Zustimmung zur Kolonnenbildung
 - Bestätigung der erfüllten Voraussetzungen (Fahrzeuge direkt hintereinander, bidirektionale Kommunikation eingerichtet)
 - Start des Kolonnenmanövers (Minimierung des Abstands und Synchronisierung)
- Kolonnenbeitritt: Ein ausgerüstetes Drittfahrzeug erkennt eine vorhandene Kolonne und stellt auf Wunsch des Fahrers eine Beitrittsanfrage. Sobald der Anfrage zugestimmt wird (z.B. maximale Kolonnenlänge nicht erreicht), wird der Kolonnenbeitritt bestätigt und das

Kolonnenmanöver gestartet. Neben den Informationen, die ähnlich wie beim Kolonnenaufbau dem Fahrer mitgeteilt werden müssen, sind beim Kolonnenbeitritt verschiedene Kolonnenmanöver denkbar, die jeweils den Beteiligten mitgeteilt werden müssen:

- Drittfahrzeug wird neuer Kolonnen-Head
- Drittfahrzeug wird neuer Kolonnen-Tail
- Drittfahrzeug vollzieht Spurwechsel zwischen zwei Kolonnenfahrzeugen und wird Kolonnen-Member
- Fahren in der Staufolgekolonne: Der Kolonnen-Head passt die Fahrgeschwindigkeit im Bereich unterhalb der Systemgrenze den Verkehrsbedingungen an. Die Follower folgen, den übermittelten Daten des Kolonnen-Head entsprechend, im Kolonnenabstand.
- Verlassen der Kolonne: Ein Fahrzeug der Kolonne möchte diese verlassen und kommuniziert dies an die anderen Fahrzeuge. Nach Bestätigung beginnt das Manöver zum Verlassen der Kolonne. Je nach Rolle des Fahrzeugs, das die Kolonne verlassen möchte, sind verschieden Beteiligte betroffen, die in das Manöver eingebunden werden müssen:
 - Kolonnen-Head verlässt die Staufolgekolonne und erster Follower übernimmt die Head-Position
 - Kolonnen-Member verlässt die Kolonne und vollzieht einen Spurwechsel, das nachfolgende Kolonnenfahrzeug schließt zum Vorausfahrenden auf
 - Kolonnen-Tail verlässt die Kolonne und erhöht den Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug.
- Auflösung der Kolonne: Aus verschiedenen Gründen kann die Auflösung der Kolonne notwendig werden. Neben unvorhersehbaren Ereignissen (z.B. Kommunikationsstörung) kann dies das Ende des Staus sein.
 - Bei Stauauflösung informiert der Kolonnen-Head die Follower. Die Folgeabstände werden auf den normalen Sicherheitsabstand vergrößert.
 - Bei einem plötzlichen Ereignis wird der Notfall vom registrierenden Fahrzeug an alle anderen Fahrzeuge in der Kolonne gemeldet. Ein Notfallmanöver wird gestartet (alle Fahrzeuge stoppen). Anschließend setzen die Kolonnenfahrzeuge die Fahrt separat fort.
- Einscherer-Erkennung: Wird von einem Fahrzeug in der Staufolgekolonne der Einscherwunsch eines nicht kolonnenfähigen Fahrzeugs erkannt, wird der Abstand zum Vorderfahrzeug erhöht. Das Fahrzeug, das den Abstand erhöht, wird zum neuen Kolonnen-Head der entstehenden Teilkolonne.

2.4 Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände

Nachfolgend werden mögliche funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände aufgezählt, die im Rahmen einer Stoffsammlung des TP1 durch die Projektpartner als relevant erachtet werden. Dies soll zur Auslegung der einzelnen Szenarien des Use Cases helfen. Die Liste beinhaltet noch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und keine Priorisierung von in IMAGinE zu untersuchenden Fragestellungen. Diese werden erst in nachfolgenden Arbeitspaketen (z.B. AP1.3) und Teilprojekten (z.B. TP5) konkretisiert.

- Die Ergebnisse der Funktion hängen von der Ausstattungsrate von Fahrzeugen ab, die mit Technologie für kooperatives Fahren ausgerüstet sind. Für die verschiedenen Szenarien kann untersucht werden, welche Auswirkungen die Ausstattungsrate auf die Funktionalität hat. Insbesondere kann untersucht werden, ab welcher Ausstattungsrate ein spürbarer Vorteil für den Verkehrsfluss und den Fahrer entsteht.
- Die kooperative Längsführung wird auch auf den Gesamtverkehr Auswirkungen haben. Eine Fragestellung ist, wie sich unter Verwendung der verschiedenen Szenarien der Gesamtverkehr verändert. Welchen Einfluss hat die Längsführung auf das Entstehen von Staus und den Durchfluss von Fahrzeugen? Mit Fahrzeugkolonnen sollte ein gleichbleibender Fluss über eine längere Strecke möglich sein. Dabei kann untersucht werden, wie der Gesamtverkehr profitiert.
- Die Szenarien der kooperativen Längsführung nutzen verschiedene IKS. Daher kann der Nutzen der Szenarien untereinander ebenso verglichen werden wie der Nutzen der verschiedenen IKS innerhalb eines Szenarios.
- Für die verschiedenen Szenarien kann untersucht werden, welche Nachrichten benötigt werden, um sie zu realisieren. Daraus ergibt sich dann die IKS. Eine Verwendung von höheren IKS ist bezüglich ihrem funktionalen Mehrwert zu untersuchen.
- Bei kooperativen Funktionen werden Informationen aus der Kommunikation mit der lokalen Sensorik fusioniert. Die Sensorik des Ego-Fahrzeugs und die anderer Fahrzeuge (kooperative Perzeption) unterliegen statistischen Verteilungen bezüglich ihrer Genauigkeit und ihrer Latenz. Bei der Untersuchung der Funktion kann daher betrachtet werden, wie weit die verschiedenen Varianzen der Perzeption die Regelung verschlechtern.
- Bei der kooperativen Längsführung können Informationen über Staus bereits frühzeitig mitgeteilt werden. Im Vergleich zu herkömmlichen ACC kann dabei geprüft werden, wie dieses frühzeitige Wissen Auswirkungen auf den Gesamtverkehr hat.
- Die Abstandsregelung zu Fahrzeugen, die vor und hinter dem Ego-Fahrzeug sind, stellt eine Neuartigkeit dar. Hierbei kann auch untersucht werden, welche Einflüsse das auf die Regelung hat, z.B. geringeres Entstehen von Schockwellen oder gleichmäßigeres Fahren in einem oder mehreren Fahrzeugen.
- Eine Funktionalität der kooperativen Längsführung ist, Warnungen von vorausfahrenden Fahrzeugen zu empfangen und in die Regelung mit einzubeziehen. Dabei kann untersucht

werden, inwieweit diese Mehrinformationen Auswirkungen auf die Regelung im Vergleich zu einem herkömmlichen ACC Regelsystem haben. Untersuchungsgegenstände sind z.B. eine mögliche verkürzte Antwortzeit des Reglers oder die Verringerung von Schockwellen.

- Gewöhnliche Abstandsregler verwenden einen Fahrschlauch, um den zu befahrenden Raum vor dem Fahrzeug zu beschreiben. Bei den Szenarien mit Einscherererkennung muss dieses Modell angepasst werden oder ein anderes Modell gefunden werden. Hierbei ist ein Untersuchungsgegenstand, welche Auswirkung das auf die Regelung hat. Insbesondere kann die kooperative Längsführung dabei mit einem gewöhnlichen ACC verglichen werden, z.B. bezüglich Reaktionszeit, Schockwellen oder Abständen zu vorausfahrenden Fahrzeugen.
- Bei der Untersuchung der Auswirkungen auf den Gesamtverkehr kann auch der Kraftstoffverbrauch analysiert werden. Bei den Staufolgekolonnen kann neben dem Fahren in der Staukolonne gesondert untersucht werden, wie der Aufbau und die Auflösung der Kolonne sich auf den Kraftstoffverbrauch auswirken.
- Bei Kolonnenfahrten können durch Verzögerungen in der Detektion von Bremsmanövern Schockwellen entstehen, die sich nach hinten weiterreichen. Daher ist ein Untersuchungspunkt, welche Abstände notwendig sind, um Kolonnenstabilität zu erreichen, welche durch Verzögerungen gefährdet sein kann. Dabei kann auch getestet werden, welche Verzögerungen tatsächlich auftreten, z.B. durch Sensorik, Kommunikation und Rechenzeit.
- Eine Kolonne besteht aus mehreren Fahrzeugen. Dabei ist ein Faktor für die Auswertung, wie hoch die Anzahl an Fahrzeugen sein kann, die sich in einer Kolonne befinden. Je größer die Anzahl der Fahrzeuge ist, umso schwieriger ist eine Abstimmung. Bei Fahrzeugkolonnen kann deshalb untersucht werden, bis zu wie vielen Fahrzeugen das möglich ist.
- Ein Untersuchungsgegenstand ist das Aussehen der Funktion im MMI. Dabei kann insbesondere untersucht werden, wie das MMI gestaltet werden sollte, um eine möglichst hohe Nutzerakzeptanz zu erreichen. Da der Unterschied zu bestehenden System bei der Staufolgekolonne am Größten ist, ist das ebenfalls ein Punkt für die Auswertung.
- Bei der Untersuchung des MMIs kann untersucht werden, wie die Funktionalität von CACC und Staufolgekolonne vom Nutzer verstanden werden können. Da die Funktion bereits aktiv sein kann, ohne dass dies für den Fahrer direkt sichtbar oder bemerkbar ist, kann untersucht werden, was dem Nutzer vermittelt werden kann, um die eigene Funktion besser zu verstehen und zu akzeptieren.
- Darüber hinaus kann die Reaktion des Fahrers untersucht werden. Das gilt einerseits für die Reaktion des Fahrers auf Informationen vom MMI. Andererseits kann auch untersucht werden, wie der Fahrer auf direkt bemerkbare Auswirkungen der Funktion reagiert, z.B. die Verringerung des Abstands bei Staufolgekolonnen.

3 FUNKTION 3: KOOPERATIVES ÜBERHOLEN AUF LANDSTRASSEN

3.1 Beschreibung

Auf Landstraßen kommt es häufig zu schweren Kollisionen mit dem Gegenverkehr.¹⁰ Diese resultieren unter anderem aus missglückten Überholmanövern oder Ausweichversuchen auf plötzlich auftauchende Objekte wie Wild oder Landwirtschaftsfahrzeuge. Ohne eine entsprechende Assistenzfunktion muss der Fahrer selbständig die Situation vor dem Überhol- bzw. Ausweichmanöver wahrnehmen und entscheiden, welches Verhalten angebracht ist. Die Wahrnehmung der Situation ist durch ein begrenztes Sichtfeld eingeschränkt und eine Einschätzung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer häufig nicht möglich. Wenn in einer Überhol- oder überholähnlichen Situation eine Gefährdung entsteht, ist es manchmal nicht möglich, eine optimale Unfallvermeidungsstrategie zu bestimmen, da diese nicht nur von der eigenen Handlungsweise abhängt. Die Zeit ist häufig auch nicht ausreichend, sich einen Überblick über die Situation zu verschaffen.

3.1.1 Use Cases und Szenarien

Zur Veranschaulichung dieser Situationen werden zwei Use Cases bearbeitet (Abbildung 3.1). Der erste Use Case adressiert die Vermeidung der Entstehung einer kritischen Situation. In dem zweiten Use Case wird versucht, in einer kritischen Situation einen Unfall zu vermeiden.

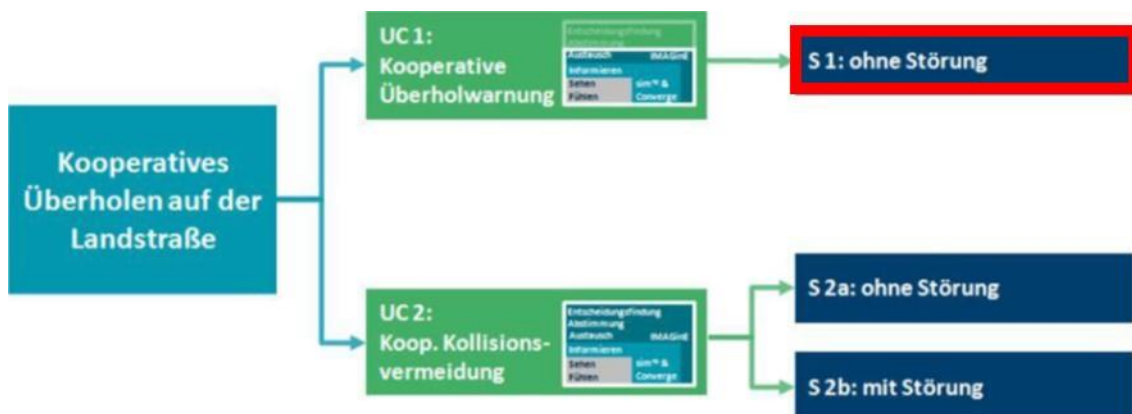


Abbildung 3.1: Funktionsbaum der Funktion F3 „Kooperatives Überholen auf Landstraßen“

Mit einem IMAGinE-System ausgestattete Fahrzeuge tauschen außer Informationen über die eigene Position und Geschwindigkeit (CAM) auch Informationen über Objekte aus, die sie mit ihrer bordeigenen Sensorik wahrnehmen (IKS 3). Daraus wird eine Warnung erzeugt, wenn der Fahrer zu einem Überholmanöver ansetzt, während sich Gegenverkehr nähert. Die Warnung kann dabei, je nach Ausstattung des Fahrzeugs, über verschiedene Medien (Head-up Display,

¹⁰ Unger, T. (2013). Berichte der ADAC Unfallforschung, Oktober 2013, ADAC Unfallforschung im ADAC Technik Zentrum Landsberg/Lech

Lenkmomentstellung am Lenkrad, akustische Warnung etc.) an den Fahrer weitergegeben werden. Abbildung 3.2 links zeigt ein mögliches Szenario für die Überholwarnung.

Wenn die Kritikalität der Situation aufgrund zeitlicher Einschränkung keine Warnung mehr zulässt, zum Beispiel bei einem querenden, nicht kommunizierenden Fahrzeug (plötzlich auftretendes Hindernis), entsteht der zweite Use Case. Hierfür wird mithilfe einer kooperativen Manöverplanung und -abstimmung ein Manöver berechnet, bei dem sowohl das eigene als auch das andere Fahrzeug zur Unfallvermeidung beitragen. Der Beitrag der Verkehrsteilnehmer kann je nach Ausprägung sowohl einen Eingriff in die Quer- als auch Längsdynamik des Fahrzeugs bedeuten. Dabei werden Verfahren vorgesehen, die adaptiv auf Störungen reagieren. Störungen beinhalten dabei unvorhergesehene Änderungen in der Umgebung (zum Beispiel neue Objekte) und Abweichung der kooperativen Fahrzeuge vom geplanten Fahrmanöver. Abbildung 3.2 rechts zeigt ein mögliches Szenario für eine Intervention in einer sicherheitskritischen Situation.

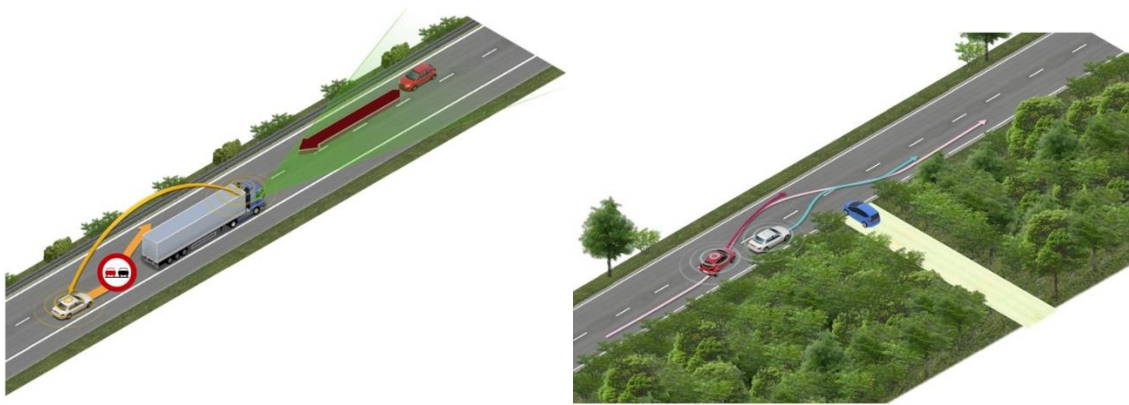


Abbildung 3.2: Beispielszenario für Use Case 1 (Warnung) und Use Case 2 (Intervention)
(Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

Bei der Umsetzung der Funktion für kooperatives Überholen auf der Landstraße stellen sich somit folgende Kernaufgaben:

- Nutzung des kooperativen Umfeldmodells zur gemeinsamen Situationsinterpretation während der Fahrt auf der Landstraße mit geeigneter Integration der kollektiven Perzeption des vorausfahrenden Fahrzeugs
- Verfahren zur kooperativen Abstimmung (basierend auf geeigneten, neu zu entwickelnden V2X-Nachrichten) und zur gemeinsamen Durchführung des Ausweichmanövers
- Geeignete Methoden zur Einbindung des Fahrers sowohl in informierender als auch intervenierender Funktionsausprägung

3.1.1 Priorisierung von Use Cases

Im weiteren Projektverlauf (Anforderungsanalyse, Umsetzung im Fahrzeug) soll der Fokus der Funktion 3 auf dem Use Case 1 „Kooperative Überholwarnung“ liegen. Ein Automatisierungsgrad wird nicht vorgegeben. Dieser Use Case „Kooperative Überholwarnung“ behandelt die wichtigste Unfallursache auf Landstraßen.

Use Case 2 „Kooperative Kollisionsvermeidung“ wird im Rahmen des Projekts IMAGinE lediglich mit einem Fokus auf die Anforderungsanalyse (insbesondere für erforderliche Nachrichtenformate und die Ausgestaltung der Situationsanalyse) und ggf. Simulation bearbeitet werden.

3.1.2 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung

Der zeitliche und räumliche Ablauf des Use Case 1 stellt sich wie folgt dar:

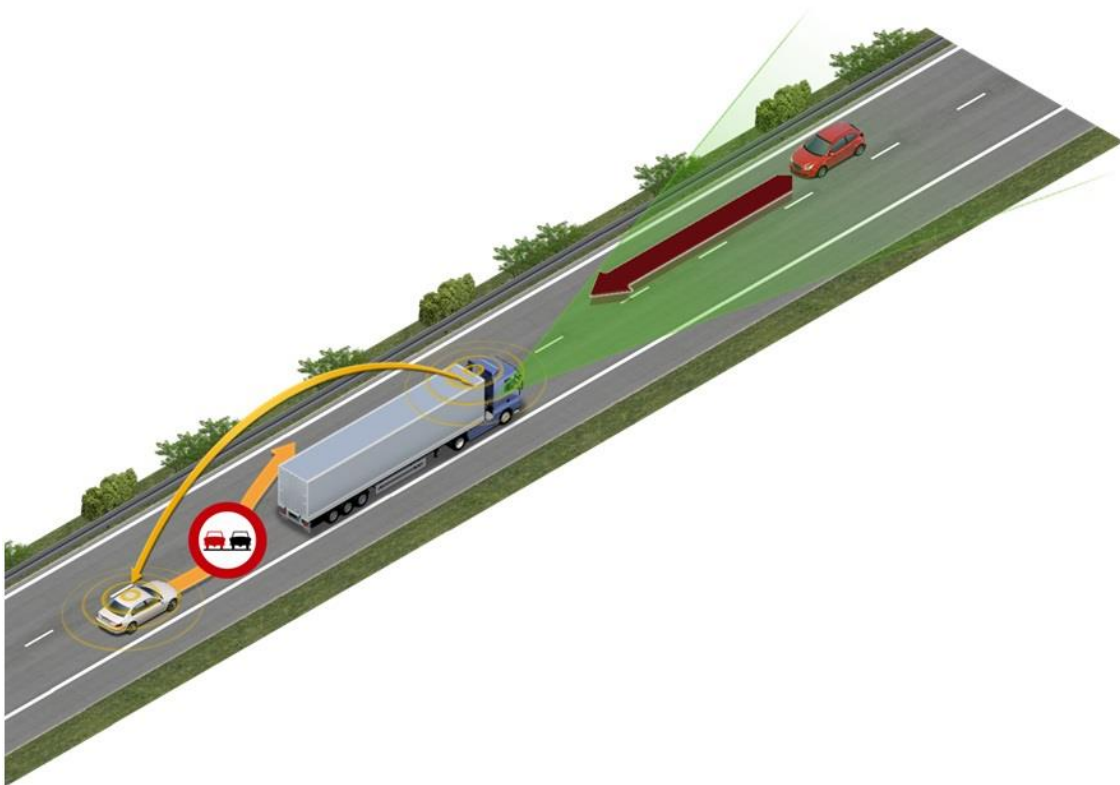


Abbildung 3.3: Use Case 1 der Funktion F3: Kooperative Überholwarnung
(Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

- Weißes Fahrzeug (W) fährt auf einen Lkw auf und setzt zum Überholen an
- Ein rotes Fahrzeug (R) kommt W und dem Lkw entgegen, sodass ein sicheres Überholen nicht möglich ist
- W kann R nicht erfassen und R ist nicht mit Kommunikation ausgestattet

- Der Lkw erfasst R und übermittelt dieses Wissen an W
- W erstellt ein kollektives Umfeldmodell und bestimmt, dass ein Ausweichen nicht möglich ist
- Der Fahrer wird mittels einer Warnkaskade darauf hingewiesen, dass ein Überholen nicht möglich ist (visuell, akustisch, haptisch, etc.)

Der zeitliche und räumliche Ablauf des Use Case 2 stellt sich wie folgt dar:

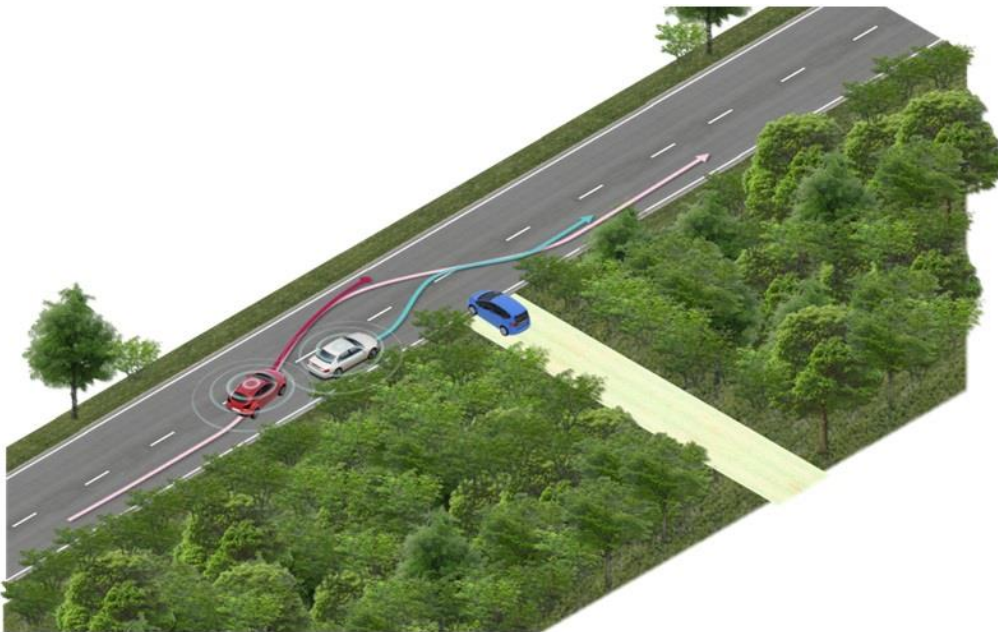


Abbildung 3.4: Use Case 2 der Funktion F3: Kooperative Kollisionsvermeidung
(Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

- Rotes Fahrzeug (R) überholt ein weißes Fahrzeug (W)
- Plötzlich fährt ein blaues Fahrzeug (B) auf die Fahrbahn
- B zwingt W zum Ausweichen, wodurch der Überholpfad von R blockiert würde
- Um eine Kollision zu vermeiden, stimmen R und W ein kooperatives Manöver ab und führen es durch
- Im Beispiel:
 - W führt Ausweichmanöver durch
 - R bremst ab, um Ausweichpfad für W freizugeben

Ausprägung	Beschreibung
Use Case-Beteiligte	Überholer, sowie umgebender Verkehr (Gegenverkehr, Überholer, Vorfahrer,...)
Kurzbeschreibung	Fahrerwarnung basierend auf kollektiver Perzeption bei kritischen Überholmanövern und Kollisionsvermeidung bei Überholvorgängen
Kooperative Warnung	Fahrerwarnung mittels kollektiver Perzeption bei kritischen Überholmanövern
Kooperative Manöver	Kollisionsvermeidung bei Überholvorgängen
Mögliche Störungen	Unterschiedliche Konstellationen bei UC2 erzwingen unterschiedliche Manöver
Automatisierungsgrad	UC1: Level 1+ / UC2: Level 3+
Kooperationsstufe	UC1: IKS 2/3 / UC2: IKS 4/5
Zeitlicher und räumlicher Ablauf	Überholwarnung: Lkw (80km/h), Ego und Gegenverkehr (100km/h); TTC Ego-Gegenverkehr (1-3s) (Überholen nicht möglich) Kooperative Kollisionsvermeidung: Ego (W) (80km/h) wird überholt mit 100km/h. Wenn Überholer (R) neben Ego ist, taucht plötzlich ein Hindernis auf seinem Fahrstreifen auf (TTC ca. 1.2s). Ego weicht dem Hindernis aus.

Tabelle 3.1: Detaillierung der Funktion F3

3.2 Funktionszerlegung

Wie eine systemgestützte kooperative Überholwarnung aus Nutzersicht ablaufen könnte, zeigt nachfolgende Abbildung. Dargestellt sind alle am Manöver beteiligten Akteure und deren Rollen.

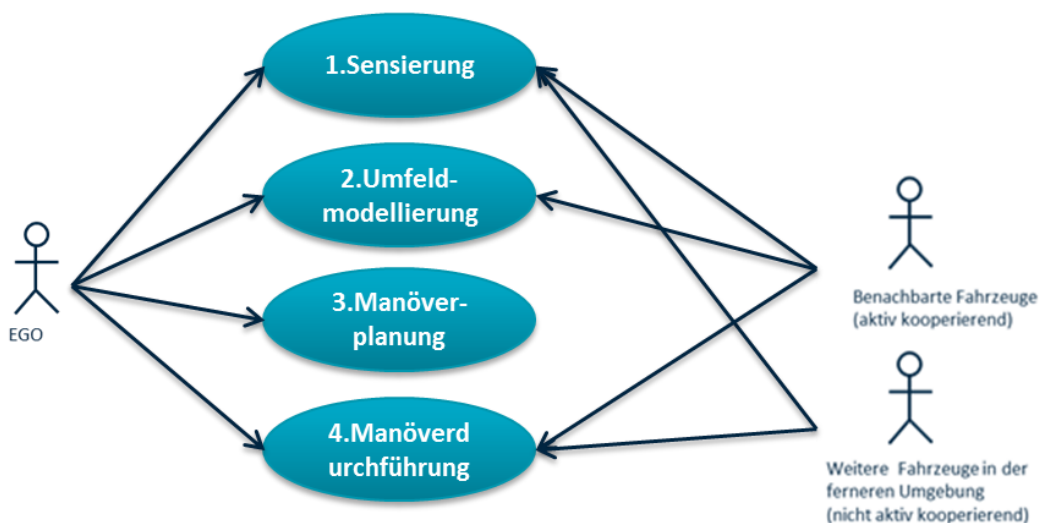


Abbildung 3.5: Big Picture der Funktion F3 „Kooperatives Überholen auf Landstraßen“

3.2.1 Fahrersicht

Aus Perspektive des Fahrers lassen sich die Use Cases genauer spezifizieren. Hierbei wird ein störungsfreier Ablauf in UC1 aus Sicht des Überholenden sowie aus Sicht des vorausfahrenden Fahrers und in UC2 aus Sicht des Ego-Fahrers und des Überholenden betrachtet. Die Betrachtung erfolgt für die manuelle Fahrt. In UC1 wird die IMAGinE-Kooperationsstufe 3 (IKS 3) und in UC2 die IMAGinE-Kooperationsstufe 5 (IKS 5) betrachtet.

UC1: Kooperative Überholwarnung

Für den Use Case 1 existieren zwei sehr wahrscheinliche Varianten, welche von Interesse sind. Diese betreffen die Ausstattungsvarianten des entgegenkommenden Fahrzeugs. Im Falle von nicht-kommunizierendem Gegenverkehr wird ein Basic Flow in Abbildung 3.6 dargestellt. Falls der Gegenverkehr selbst Möglichkeiten der V2V-Kommunikation besitzt, kann die zweite Variante zum Tragen kommen, die in Abbildung 3.7 zu sehen ist.

In der ersten Variante nähert sich ein Fahrzeug an ein langsames Fahrzeug an (hier ein LKW), welches nach IKS 3 sein Umfeld wahrnimmt und diese Erkenntnisse der Umgebung mitteilt. Das ankommende Fahrzeug profitiert davon und kann den vom LKW erkannten Gegenverkehr in seine eigene Wahrnehmung aufnehmen. Falls ein Überholwunsch offensichtlich wird (Verringerung des Abstands auf das vorausfahrende Fahrzeug, Setzen des Blinkers, Überfahren der Mittellinie), wird dieser Gegenverkehr dem Fahrer des Überholenden als Warnung dargestellt. Das Manöver gilt entweder als beendet, wenn das Überholmanöver abgebrochen wird oder wenn in Abwesenheit von Gegenverkehr, das Überholmanöver abgeschlossen wird.

Die Variante 2 unterscheidet sich in der Sensierungsphase von der ersten Variante. Der Gegenverkehr kann von sich aus CAM oder EPM Nachrichten versenden und somit sein Ankommen ankündigen. Dadurch existiert keine technologische Anforderung an das blockierende Fahrzeug. Eine weitere Spielart kann die Variante sein, dass ein entgegenkommendes Fahrzeug per EPM sein Umfeld mitteilt und somit erkannt wird, dass ein nicht-kommunizierendes Fahrzeug zwischen diesem und dem potentiellen Überholer zu finden ist.

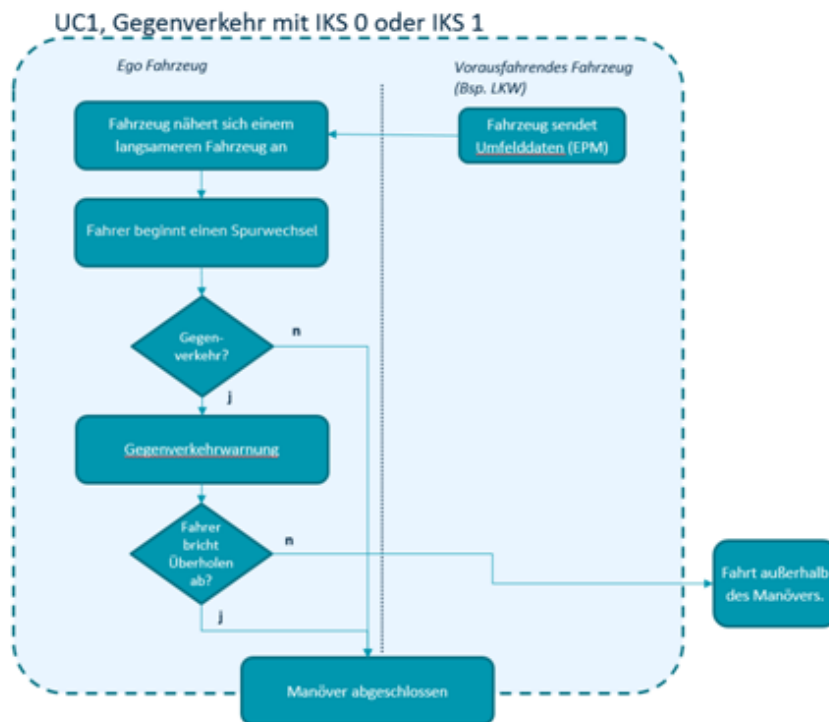


Abbildung 3.6: Interaktionsdiagramm des UC1 „Überholwarnung“ aus Fahrersicht (Gegenverkehr mit IKS0/1)

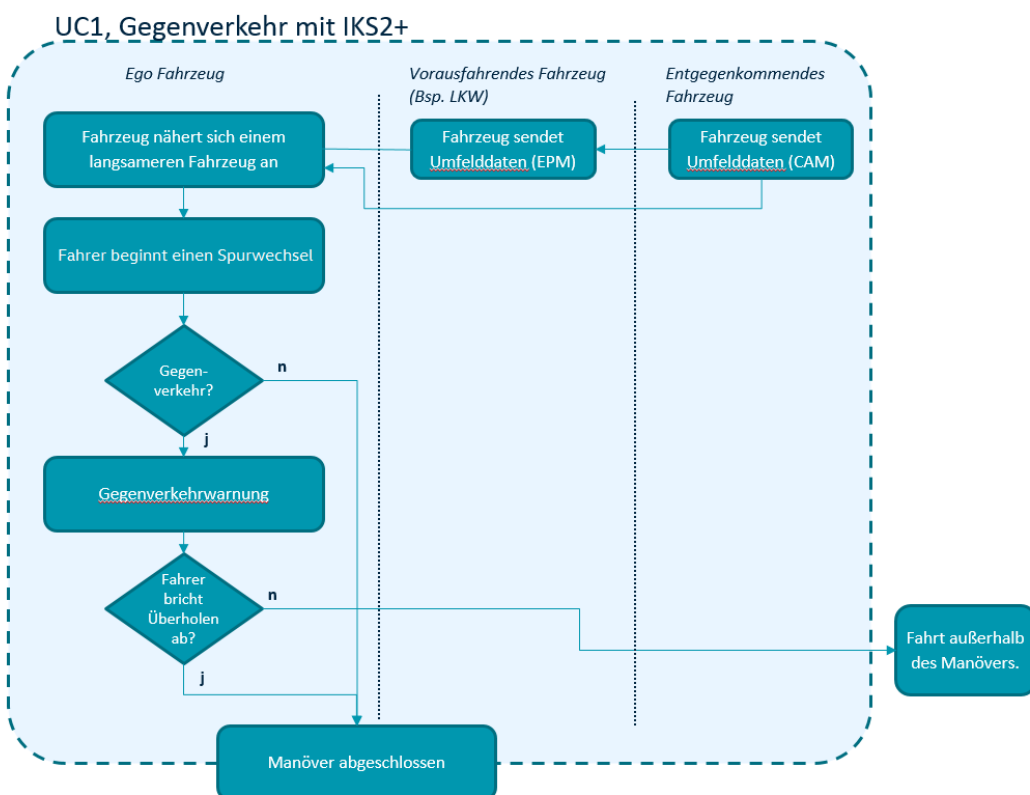


Abbildung 3.7: Interaktionsdiagramm des UC1 „Überholwarnung“ aus Fahrersicht (Gegenverkehr mit IKS2+)

Überholwarnung	Basic Flow – Überholer	Basic Flow – Vorfahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	Der Überholer nähert sich einem langsamen Fahrzeug von hinten und beginnt ein Überholmanöver. Das System warnt den Fahrer bei Gegenverkehr („Überholwarnung“). Der Fahrer bricht den Überholvorgang ab.	Das System übermittelt Daten aus seiner Bordeigenen Sensorik an Überholer.
Abbruchvarianten	- System steht nicht zur Verfügung (div. Gründe) - Fahrer bricht den Überholvorgang nicht ab.	

Tabelle 3.2: Ablauf des UC1 „Überholwarnung“ der Funktion F3 aus Fahrersicht

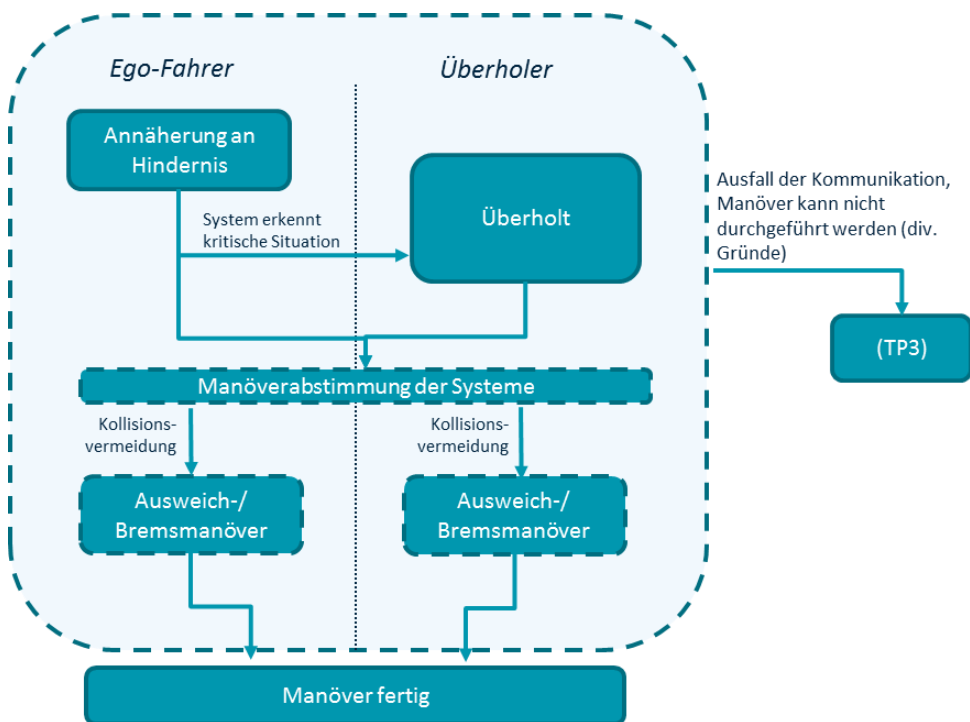
UC2: Kooperative Kollisionsvermeidung

Abbildung 3.8: Interaktionsdiagramm des UC2 „Kollisionsvermeidung“ aus Fahrersicht

Kollisionsvermeidung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow - Überholer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	Der Fahrer möchte einem Hindernis ausweichen. Das System erkennt dies als eine kritische Situation („Vorsicht Hindernis“) und versendet diese Information an weitere Fahrzeuge. Nach erfolgter Manöverabstimmung mit einem überholenden Fahrzeug führt das System ein Ausweichmanöver durch, um eine Kollision zu vermeiden („Kollisionsvermeidung“).	Der Überholer startet einen Überholvorgang. Das System empfängt vom Vorderfahrzeug, dass eine kritische Situation durch ein Hindernis erkannt wurde und wertet diese Information aus. Nach erfolgter Manöverabstimmung führt das System ein Ausweichmanöver durch, um eine Kollision zu vermeiden („Kollisionsvermeidung“).
Abbruchvarianten	- Hindernis blockiert gesamten Fahrstreifen - Kritische Situation nicht erkannt - Kein kollisionsvermeidendes koop. Manöver möglich - Fahrer des Überholers übersteuert koop. Manöver - Koop. Manöver können nicht umgesetzt werden	

Tabelle 3.3: Ablauf des UC2 „Kollisionsvermeidung“ der Funktion F3 aus Fahrersicht

3.2.2 Fahrzeugsicht

Auf Basis des Prinzips der „Deliberative Control Architecture“ kann die Funktion in F3 – UC1 und UC2 aufgeteilt werden.

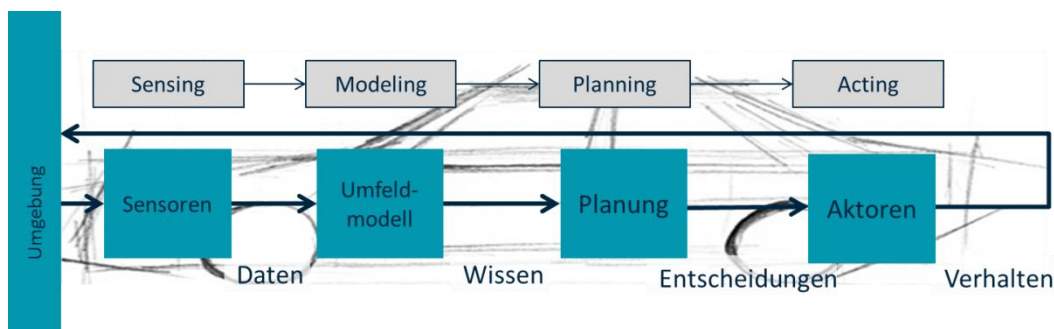


Abbildung 3.9: „Deliberative Control Architecture“ - Prozess zum kooperativen Verhalten

UC1: Kooperative Überholwarnung

Wie der Prozess zum kooperativen Verhalten für Use Case 1 der Funktion F3 (Kooperative Überholwarnung) ablaufen könnte, zeigt nachfolgende Abbildung. Der Lkw detektiert das entgegenkommende Fahrzeug (Sensing) und versendet seine Umfeldwahrnehmung per V2X Kommunikation. Das überholende weiße Fahrzeug wertet die empfangene Information aus (Modelling) und warnt den Fahrer vor der Gefahr (Planning). Infolge der Warnung bricht der Fahrer den Überholvorgang ab (Acting).

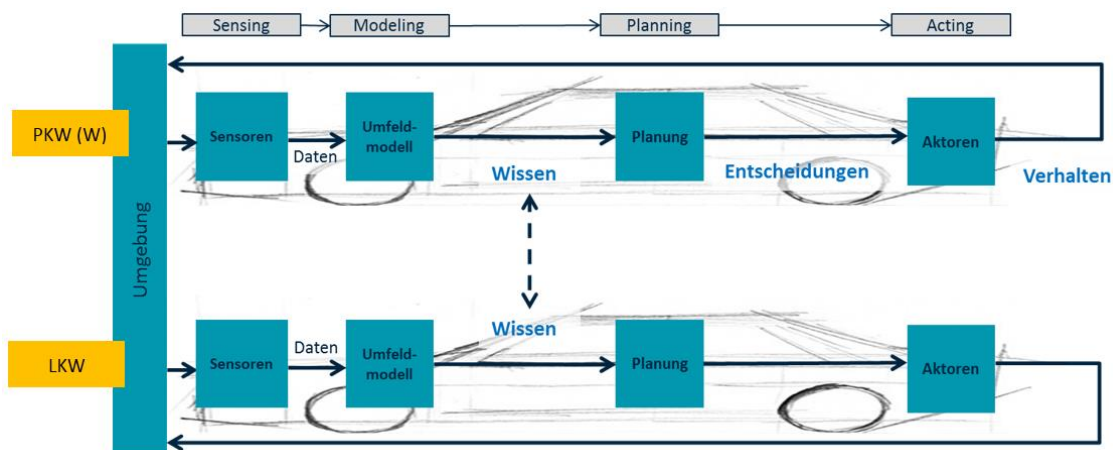


Abbildung 3.10: „Deliberative Control Architecture“ - Prozess zum kooperativen Verhalten für Use Case 1 der Funktion F3

Phasen 1 und 2 „Sensierung & Umfeldmodellierung“

EGO	LKW	Gegenverkehr
1.1 nähert sich Lkw von hinten		
	1.2a erkennt Gegenverkehr	1.2b kommt Lkw entgegen
	1.3 übermittelt Wissen über Gegenverkehr	
1.4 ergänzt sein eigenes Wissen um die Informationen des Lkw		

Tabelle 3.4: Basic Flow der Phasen 1 und 2 des UC1 der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht

Phase 3 „Manöverplanung“

EGO	LKW	Gegenverkehr
1.5 Fahrer beginnt das Überholmanöver		
1.6 Kritikalität des Überholmanövers wird bestimmt		
1.7 Fahrerwarnung		

Tabelle 3.5: Basic Flow der Phase 3 des UC1 der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht

Phase 4 „Manöver durchführen“

EGO	LKW	Gegenverkehr
1.8 Fahrer bricht Überholvorgang ab		

Tabelle 3.6: Basic Flow der Phase 4 des UC1 der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht

Wie eine systemgestützte kooperative Überholwarnung aus Nutzersicht ablaufen könnte, zeigt nachfolgende Abbildung. Dargestellt sind alle am Manöver beteiligten Akteure und deren Rollen.

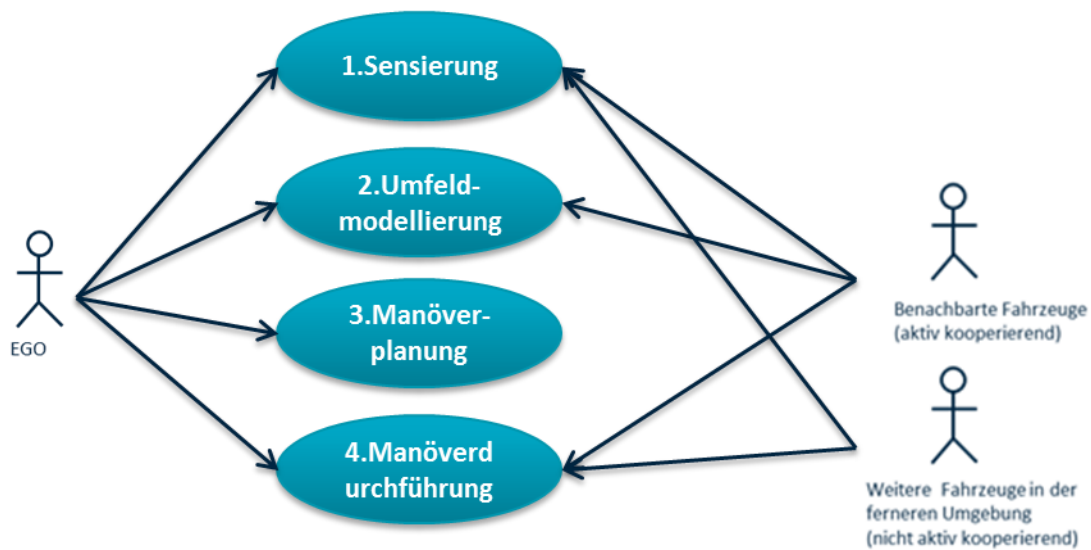


Abbildung 3.11: Big Picture Use Case 1 „Kooperative Überholwarnung“ der Funktion F3

Die Beschreibung der einzelnen Schritte wird nachfolgend nochmals gesammelt (zum besseren Verständnis) in Tabelle 3.7 auf Basis eines Basic Flows durchgeführt, welcher den normalen Ablauf der Funktion darstellt.

EGO	Lkw	Gegenverkehr
1.1 Nähert sich Lkw von hinten		
	1.2a Erkennt Gegenverkehr	1.2b Kommt Lkw entgegen
	1.3 Übermittelt Wissen über Gegenverkehr	
1.4 Ergänzt sein eigenes Wissen um die Informationen des Lkw		
1.5 Fahrer beginnt das Überholmanöver		
1.6 Kritikalität des Überholmanövers wird bestimmt		
1.7 Fahrerwarnung		
1.8 Fahrer bricht Überholvorgang ab		

Tabelle 3.7: Ablauf des UC1 „Überholwarnung“ der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht

Für diesen Anwendungsfall wird keine Störung oder Alternative betrachtet.

UC2: Kooperative Kollisionsvermeidung

Wie der Prozess zum kooperativen Verhalten für Use Case 2 der Funktion F3 (Kooperative Kollisionsvermeidung) ablaufen könnte, zeigt Abbildung 3.4. Der PKW1 (W) detektiert (Sensing) ein sich von der Seite näherndes Fahrzeug (eine entstehende kritische Situation) und versendet seine Umfeldwahrnehmung per V2X Kommunikation. Das überholende rote Fahrzeug PKW2 (R) wertet die empfangene Information aus (Modelling). Um eine Kollision zu vermeiden, stimmen R und W ein kooperatives Manöver ab (Planning) und führen es durch (Acting) (vgl. Abbildung 3.12). Hierfür wird mithilfe der kooperativen Manöverplanung und -abstimmung ein Manöver berechnet, bei dem sowohl das eigene als auch das andere Fahrzeug zur Unfallvermeidung beitragen. Der Beitrag der Verkehrsteilnehmer kann je nach Ausprägung sowohl einen Eingriff in die Quer- als auch Längsdynamik des Fahrzeugs bedeuten. Dabei werden Verfahren vorgesehen, die adaptiv auf Störungen reagieren (Überwachung). Störungen beinhalten dabei unvorhergesehene Änderungen in der Umgebung (zum Beispiel neue Objekte) und Abweichung der kooperativen Fahrzeuge vom geplanten Fahrmanöver.

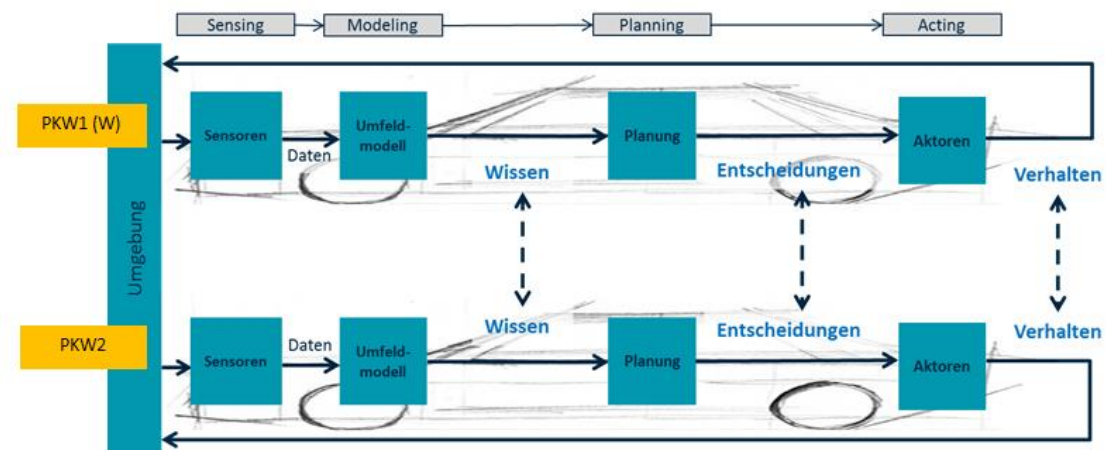


Abbildung 3.12: „Deliberative Control Architecture“ - Prozess zum kooperativen Verhalten für Use Case 2 der Funktion F3

Einen detaillierten Prozessablauf zum kooperativen Verhalten für Use Case 2 der Funktion F3 „Kooperative Kollisionsvermeidung“ zeigt die nachfolgende Abbildung.

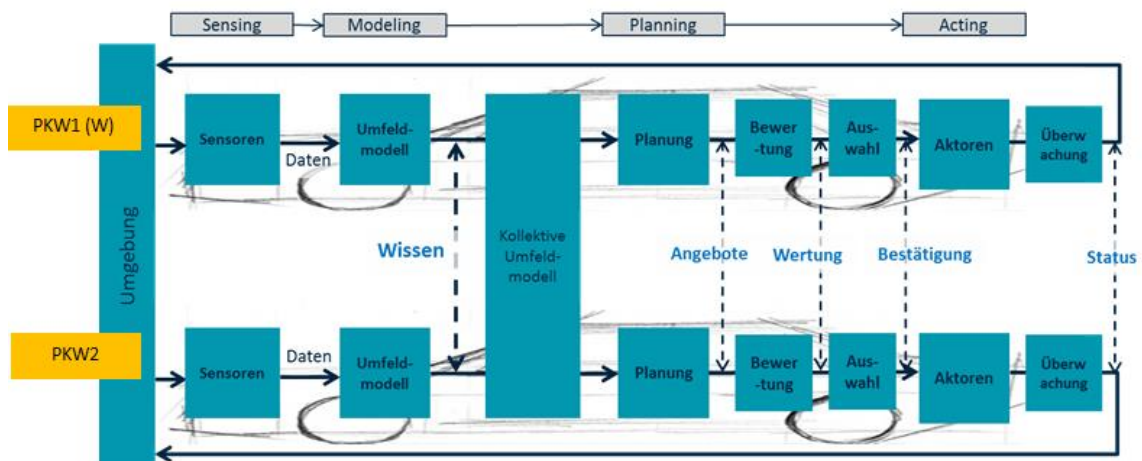


Abbildung 3.13: „Deliberative Control Architecture“ - detaillierter Prozessablauf zum kooperativen Verhalten für Use Case 2 der Funktion F3 „Kooperative Kollisionsvermeidung“

Phasen 1 und 2 „Sensierung & Umfeldmodellierung“

EGO	Überholer	Hindernis
2.1a Fahren auf Landstraße	2.1b Überholen starten	
		2.2 Auf Ego-Fahrsstreifen auftauchen und am Rand zum Stehen kommen
2.3 Kritische Situation erkennen (Crash bei Bremsen unabwendbar)		

Tabelle 3.8: Basis Flow in Phase 1 „Sensierung“ und Phase 2 „Umfeldmodellierung“ von UC2 der Funktion F3

Phase 3 „Manöverplanung“

EGO	Überholer	Hindernis
2.4 Notmanöver berechnen und Kooperationsbedarf mit Überholer ableiten		
2.5 koop. Manöver vorschlagen		
2.6a koop. Manöver entscheiden	2.6b koop. Manöver entscheiden	

Tabelle 3.9: Basis Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ von UC2 der Funktion F3

Phase 4 „Manöver durchführen“

EGO	LKW	Gegenverkehr
2.7a koop. Manöver durchführen	2.7b koop. Manöver durchführen	
2.8 Alle Fahrzeuge haben minimal kritischen Zustand erreicht		

Tabelle 3.10: Basis Flow in Phase 4 „Manöverdurchführung“ von UC2 der Funktion F3

Wie eine systemgestützte kooperative Kollisionsvermeidung aus Nutzersicht ablaufen könnte, zeigt nachfolgende Abbildung. Dargestellt sind alle am Manöver beteiligten Akteure und deren Rollen.

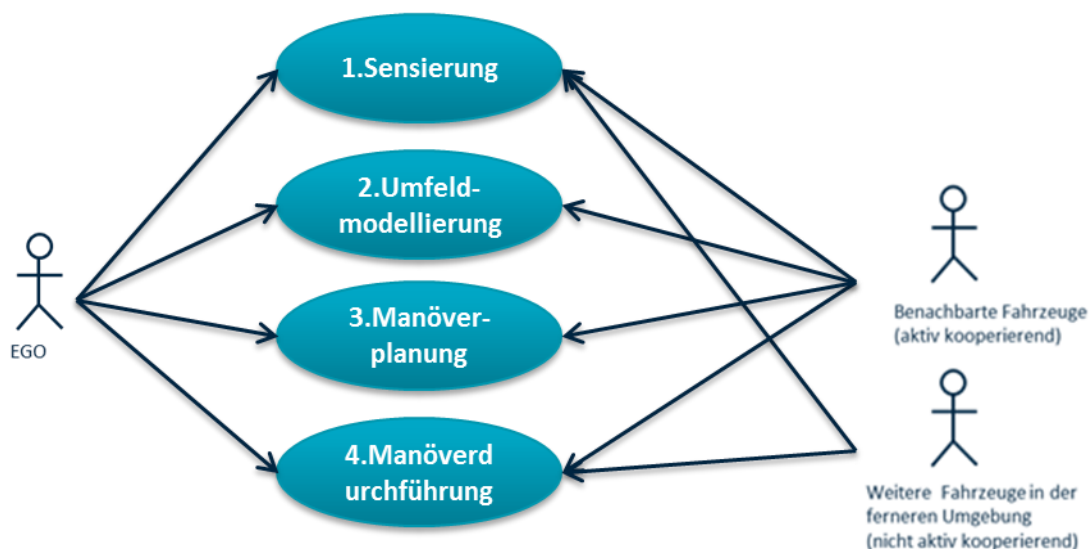


Abbildung 3.14: Big Picture Use Case 2 „Kooperative Überholwarnung“ der Funktion F3

Die Beschreibung der einzelnen Schritte wird nachfolgend nochmals gesammelt (zum besseren Verständnis) auf Basis eines Basic Flows durchgeführt, welcher den normalen Ablauf der Funktion darstellt in Tabelle 3.11.

EGO	Überholer	Hindernis
2.1a Fahren auf Landstraße	2.1b Überholen starten	
		2.2 Auf Ego-Fahrsstreifen auftauchen und am Rand zum stehen kommen
2.3 Kritische Situation erkennen (Crash bei Bremsen unabwendbar)		
2.4 Notmanöver berechnen und koop. Bedarf mit Überholer ableiten		
2.5 koop. Manöver vorschlagen		
2.6a koop. Manöver entscheiden	2.6b koop. Manöver entscheiden	
2.7a koop. Manöver durchführen	2.7b koop. Manöver durchführen	
2.8 Alle Fahrzeuge haben minimal kritischen Zustand erreicht		

Tabelle 3.11: Ablauf des UC2 „Kollisionsvermeidung“ der Funktion F3 aus Fahrzeugsicht

Folgende Störungen oder Alternativen sind für diesen Anwendungsfall denkbar:

- Hindernis blockiert gesamten Fahrstreifen
- Kritische Situation nicht erkannt
- Kein kollisionsvermeidendes kooperatives Manöver möglich
- Fahrer des Überholers übersteuert kooperative Manöver
- Kooperative Manöver können nicht umgesetzt werden

3.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der Literaturanalyse sowie der sich daraus ergebenden Implikationen für das MMI gegeben.

3.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands

Überholen auf zweispurigen Landstraßen ist ein anspruchsvolles Fahrmanöver. Die häufigste Unfallursache ist Überholen trotz Gegenverkehr (Richter & Ruhl, 2014). Um einen Überholvorgang genauer zu betrachten, unterteilen Wilson und Best (1982) Überholvorgänge auf zweispurigen Straßen in drei Phasen, woraus Hegeman et al. (2005) ein Aufgabenmodell des Fahrers mit fünf Phasen und mehr als 20 Unteraufgaben ableiten. Die fünf Phasen sind (1) die Entscheidung zum Überholen zu treffen, (2) den Überholvorgang vorzubereiten, (3) einen Spurwechsel auf die linke Spur durchzuführen, (4) am zu überholenden Fahrzeug vorbei zu fahren und (5) den Spurwechsel zurück zu tätigen. Nach Schittenhelm (2011) hat der Fahrer im überholenden Fahrzeug dabei zwei wesentliche Aufgaben:

- Schätzung der TTC (Time to collision) mit dem entgegenkommenden Fahrzeug
- Schätzung der TSR (Time to a safely return), d.h. der notwendigen Zeit für eine sichere Ausführung des Überholmanövers

In der Literatur werden vier Überholformen/-strategien (Hegeman et al., 2005) unterschieden. Die häufigste Form sind (1) beschleunigende Überholvorgänge (Houtenbros et al., 2005). Hierbei muss ein Überholender auf eine Überholmöglichkeit warten und die Geschwindigkeit dem Vorderfahrzeug anpassen. Erst nach einiger Zeit ist es möglich zu überholen und der Fahrer muss während des Überholvorgangs beschleunigen. Eine weitere Form sind (2) fliegende Überholvorgänge, bei denen ohne eine Geschwindigkeitsanpassung überholt werden kann. Bei (3) Huckepack-Überholvorgängen überholen zwei Fahrzeuge gleichzeitig ein langsames Vorderfahrzeug und (4) bei der Variante 2+ überholt ein Überholender zwei oder mehrere Fahrzeuge. Je nach Überholstrategie unterscheidet sich die Überholdauer (Hegeman et al., 2005) sowie die akzeptierte Lücke im Gegenverkehr (Llorca et al., 2013).

Das Zeitfenster für einen Überholvorgang beträgt ca. 8-14 s (vgl. Llorca et al., 2013). Die Überholdauer hängt neben der Überholstrategie von der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs (Hegeman et al., 2005) sowie der Differenzgeschwindigkeit und dem Folgeabstand zum Startzeitpunkt des Überholmanövers (Llorca et al., 2013) ab. Je geringer die Differenzgeschwindigkeit und je größer der Folgeabstand, desto länger dauert ein Überholvorgang.

Weiteren Einfluss auf einen Überholvorgang haben die Verkehrsdichte und die Art der Verkehrsteilnehmer (Vetters & Jährig, 2015). Auch der Automatisierungsgrad der Fahrzeuge spielt eine Rolle. Die meisten Untersuchungen finden bislang allerdings beim manuellen Fahren statt. Ein Vergleich von Überholmanövern mit einem teilautomatisierten System mit intelligenter Geschwindigkeitsanpassung zeigt, dass Fahrer ihr Verhalten ändern, indem sie seltener Überholen und mit kürzeren Abständen ein- bzw. ausscheren (Jamson et al., 2012). Ferner beeinflussen individuelle Fahrereigenschaften ein Überholmanöver (Farah, 2011 und Llorca et al., 2013). So haben Alter und Geschlecht einen Einfluss auf die Häufigkeit, den Zeitabstand zum Vorderfahrzeug beim Initiieren des Überholvorgangs, die Größe einer kritischen Lücke und die Überholdauer.

Bisherige Assistenzkonzepte versuchen den Fahrer bei der Entscheidung zu unterstützen, ob ein Überholvorgang sicher durchgeführt werden kann. Dies kann einerseits auf Basis der Streckengeometrie erfolgen. Löwenau et al. (2006) nutzen beispielsweise Navigationsdaten wie Kurven und Schilder und informiert den Fahrer, ob es sicher ist zu überholen. Andererseits kann ein Überholvorgang anhand einer Bewertung der verfügbaren Lücke zum nächsten entgegenkommenden Fahrzeug unterstützt werden, beispielsweise über eine ampelähnliche Darstellung (Hegeman et al., 2007). Diese signalisiert dem Fahrer, ob ein Überholvorgang sicher durchgeführt werden kann. Neben visuellen MMI-Lösungen sind in der Literatur auch Lösungen zu auditiven MMIs (z.B. Schittenhelm, 2011) zu finden.

3.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung

Folgende Empfehlungen zur MMI-Gestaltung können aus der Literaturrecherche abgeleitet werden:

- Die Gestaltung sollte vermeiden, dass eine fehlende Warnung vom Fahrer als Überholmöglichkeit interpretiert wird (Misuse).
- Überholverbote (Schilder und durchgezogene Linien) sowie Umgebungsbedingungen (Hügel und Kurven, Kreuzungen und Kreisverkehre) sollten einbezogen werden.
- Eine Bewertung sollte über den gesamten Überholvorgang stattfinden.

3.4 Funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände

Zu Use Case 1:

- Benötigt der Kooperationspartner die Information, dass Daten gesendet werden?

- Wie muss die Überholwarnung gestaltet sein, damit der Fahrer sie versteht und den Überholvorgang abbricht?
- Wie kann eine Verhaltensanpassung vermieden werden, die das System von einem Überholwarner („Achtung es gibt Gegenverkehr“) zu einem Überholassistenten („System warnt nicht, also ist frei.“) macht?

Zu Use Case2:

- Benötigen der Ego-Fahrer und der Überholer eine Information, dass eine kritische Situation erkannt wurde? Wie sollte diese Information aussehen?
- Wie muss die Information gestaltet sein, wenn die Kollisionsvermeidung automatisiert durchgeführt wird?

4 FUNKTION 4: KOOPERATIV-STRATEGISCHE VERKEHRSVERTEILUNG

Bisher sind Navigation und Routenempfehlungen unabhängig vom Medium, wie z.B. Navigationssystemen im Fahrzeug oder infrastrukturseitigen dynamischen Wegweisern, nur auf Grundlage von Reisezeitverlusten und Streckenlängen möglich. Außerdem ist eine Integration lokal kollektiver strategischer Routenempfehlungen von der individuellen Navigation unabhängig, so dass diese sich im ungünstigsten Fall widersprechen. Eine optimierte Verkehrsverteilung im verfügbaren Straßennetz unter Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitäten ist damit bisher nicht möglich. IMAGinE setzt an diesem Punkt an.

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.

4.1 Beschreibung

Im Rahmen der Funktion „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“ versenden Fahrzeuge Informationen zur Ermittlung von Kenngrößen auf Haupt- und Alternativrouten an den strategischen Support. Der strategische Support 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, stimmen diese vor den entsprechenden Entscheidungspunkten (siehe Abbildung 4.1) auf ihrer Route mit ihren Intentionen bzgl. Ziel und Routenkriterien untereinander ab und berechnen die nutzer- und kollektivoptimierte Route.



Abbildung 4.1: Entscheidungspunkt der Funktion F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“

(Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

4.1.1 Use Cases und Szenarien

Innerhalb der Funktion F4 wird im Rahmen von IMAGinE ein Use Case untersucht, welcher den Austausch der Verkehrsinformationen zwischen strategischem Support und den Fahrzeugen sowie die Abstimmung der Verkehrsverteilung zwischen den Fahrzeugen am Entscheidungspunkt vorsieht.

Dieser Use Case umfasst zwei mögliche Szenarien, vgl. Abbildung 4.2:

- Szenario 1a: Der Entscheidungspunkt liegt an einer Abfahrt von einer Bundesautobahn.

In diesem Szenario befinden sich die Fahrzeuge auf der Autobahn und es gibt in der Regel nur zwei Möglichkeiten für eine Route: Die Hauptroute (der Autobahn folgend) und die Alternativroute (z.B. Landstraße). Die Verkehrslage auf der Autobahn ist gut durch Infrastrukturdetektoren abgedeckt. Die Verkehrslage auf der Alternativroute ist insbesondere im Basisnetz auf Grundlage von Fahrzeugdaten zu ermitteln. Die Abstimmung der Fahrzeuge untereinander hat zwischen zwei Anschlussstellen vor dem Entscheidungspunkt zu erfolgen. Dieses Szenario wird im Rahmen des Projekts IMAGinE demonstrierbar in den Fahrzeugen umgesetzt und mit Hilfe einer Simulation unterstützt.

- Szenario 1b: Der Entscheidungspunkt liegt an einem Knotenpunkt im Basisnetz.

In Szenario 1b befinden sich die Fahrzeuge nicht auf der Autobahn und es kann mehr als zwei alternative Routen geben. Die Fahrzeuge bewegen sich auf einen Knotenpunkt z.B. mit Lichtsignalanlage oder verkehrszeichengeregelter Vorfahrt zu. Die Abstände zwischen den

Knotenpunkten, die auch Entscheidungspunkte sind, können beliebig variieren und z.T. sehr klein sein.

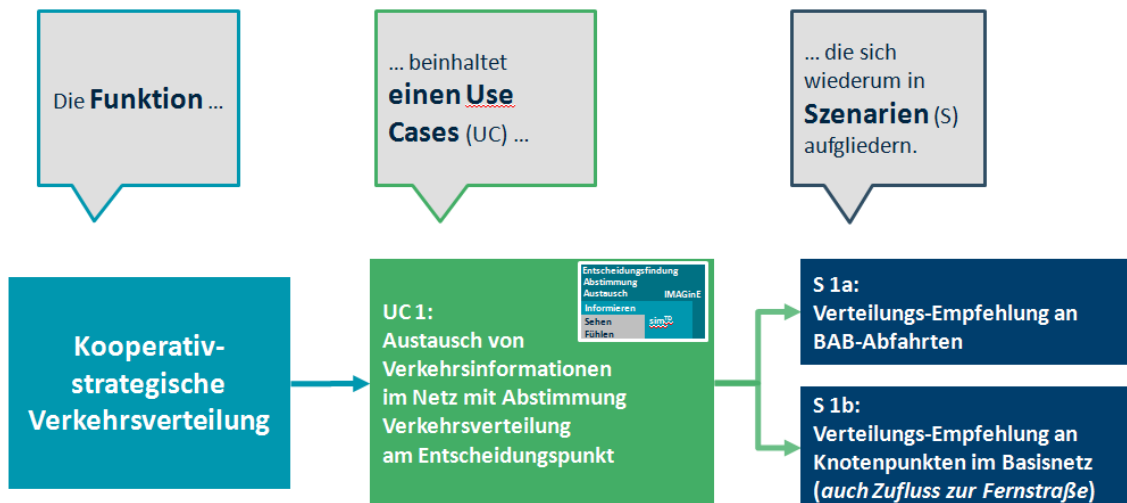


Abbildung 4.2: Funktionsbaum für die Funktion F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“

4.1.2 Priorisierung von Use Cases und Szenarien

Es wurde Szenario 1a zur Umsetzung im Fahrzeug ausgewählt, da die Verkehrslageermittlung auf Basis von Infrastrukturdaten auf Autobahnen bzw. auf bestimmten Alternativrouten bereits in ausreichender Qualität vorhanden ist, um die Funktion mit wenigen Fahrzeugen realisieren zu können.

Szenario 1b wird im Rahmen des Projekts IMAGinE lediglich verkehrlich simuliert.

4.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung

Zur Verbesserung des Manöververständnisses werden folgende Annahmen für den Entscheidungspunkt BAB Ausfahrt, getroffen.

- Die Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn fahren mit 33 m/s (120 km/h).
- Als V2X-Technologie wird ITS-G5 verwendet. Die Reichweite wird im Szenario mit 400m angenommen.
- Durch diese Reichweite ergibt sich ein Manöverabstimmungsbereich von ebenfalls 400m, damit das gerade am Trennungspunkt befindliche Fahrzeug mit dem nachfolgenden Verkehr kommunizieren kann.

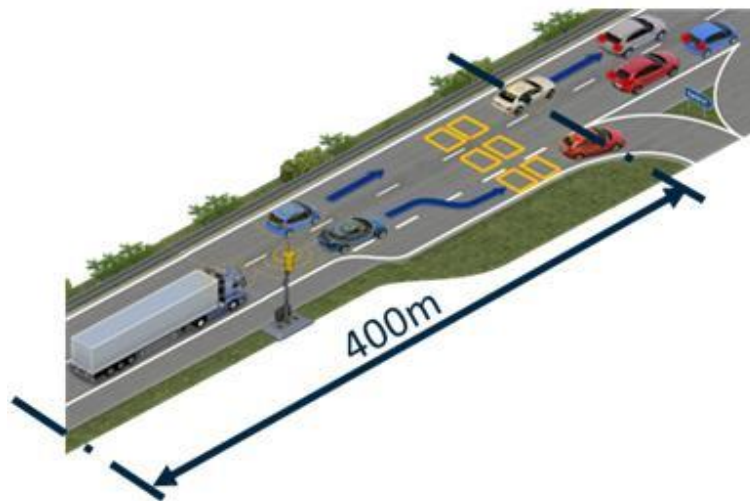


Abbildung 4.3: Räumliche Ausdehnung des Manöverabstimmungsbereichs der Funktion F4

- Der Zeitraum für die kooperative Manöverausführung beträgt ca. 10s. Hierbei werden die Dauer des Austauschs der Informationen für IKS 3 bzw. die Abstimmung für IKS 4 und die Reaktionszeit des Fahrers berücksichtigt.
- Bei einer zweispurigen¹¹ BAB befinden sich bei einer mittleren Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h und einem Abstand zwischen den Fahrzeugen, der der „halben Tachoanzeige“ entspricht (60 m; synchron 65m / Fahrzeug), 12 Fahrzeuge innerhalb der Kommunikationsreichweite.

Wird eine Kooperationsstufe von IKS 3 angenommen, so entscheiden die Fahrzeuge auf Basis der Routenkriterien selbstständig, inwieweit sie einer Ausfahrempfehlung folgen. Auf der Navigationsebene kann der Strategische Support auf Basis der Fahrdatenerfassung (IKS 2) durch eine Veränderung der Verteilungsempfehlung nachsteuern.

Bei einer Kooperationsstufe IKS 4 sind die Fahrzeuge idealerweise in der Lage, eine Abweichung der Ist- von der Vorgabesituation zu erkennen und zu kommunizieren. Im Fall IKS 5 können zusätzlich die Abbiegeabsichten beteiligter Fahrzeuge aufgrund einer Abwägung kooperativer Kriterien angepasst werden.

4.2 Funktionszerlegung

Die infrastrukturseitigen Bestandteile der Funktion F4 lassen sich mit den vorgesehenen Abläufen (Basic Flow) entsprechend Abbildung 4.4 vergleichbar zur Darstellung der anderen, fahrzeugfesten Funktionen in die Phasen Wahrnehmung, Modellierung, Planung und Durchführung unterteilen.

¹¹ Im Hinblick auf die Erprobung der Funktion im IMAGinE Rahmen wurden zwei Fahrstreifen angenommen.

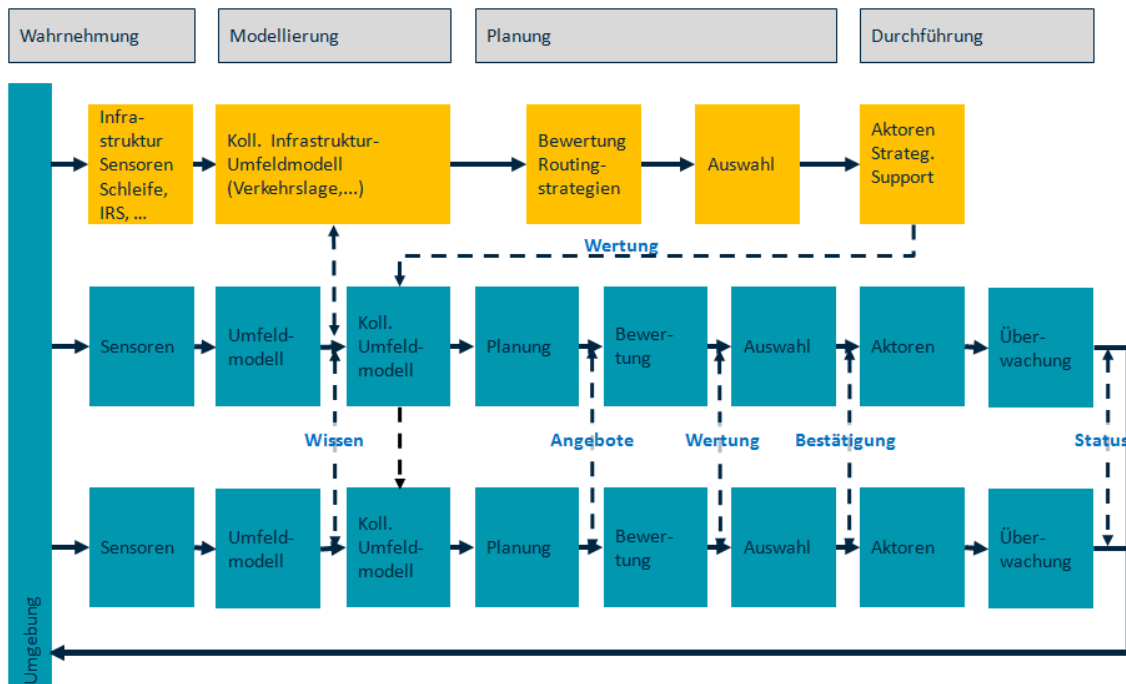


Abbildung 4.4: Einbindung der Infrastruktur in das IMAGinE-Modell

Die Funktion F4 kann in sechs wesentliche Schritte aufgeteilt werden:

1. Routenwahlkriterien wählen und festlegen (= Sensierung)
2. Fahrdaten liefern (= Sensierung)
3. Verkehrslage und Strategien ermitteln (= Umfeldmodellierung)
4. Attribute für Handlungsrichtlinien und eine Verteilungsempfehlung übermitteln (= Manöverplanung)
5. Routenwahl kommunizieren und abstimmen (= Manöverplanung)
6. Manöver durchführen (= Manöverdurchführung)

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.

Das Zusammenspiel der an der Funktion beteiligten Akteure auf Basis dieser Schritte wird in Abbildung 4.5 verdeutlicht.



Abbildung 4.5: Big Picture der Funktion F4 „Kooperativ-strategische Verkehrsverteilung“

Der konkrete Ablauf der einzelnen Schritte wird im Folgenden sowohl aus Fahrersicht als auch aus Fahrzeugsicht konkretisiert. Bei der Betrachtung aus Fahrzeugsicht wird der störungsfreie Normalbetrieb in Form eines „Basic Flow“ in Form von Interaktionstabellen und -diagrammen dargestellt. Mögliche Störungen und sich ergebende Handlungsalternativen werden für jeden der Schritte in Form eines „Alternative Flow“ beschrieben.

4.2.1 Fahrersicht

Diese Spezifikation skizziert ein Interaktionskonzept, welches im Rahmen des Projekts IMAGinE durch Realversuche und Expertenbefragungen auf Funktionalität überprüft werden soll.

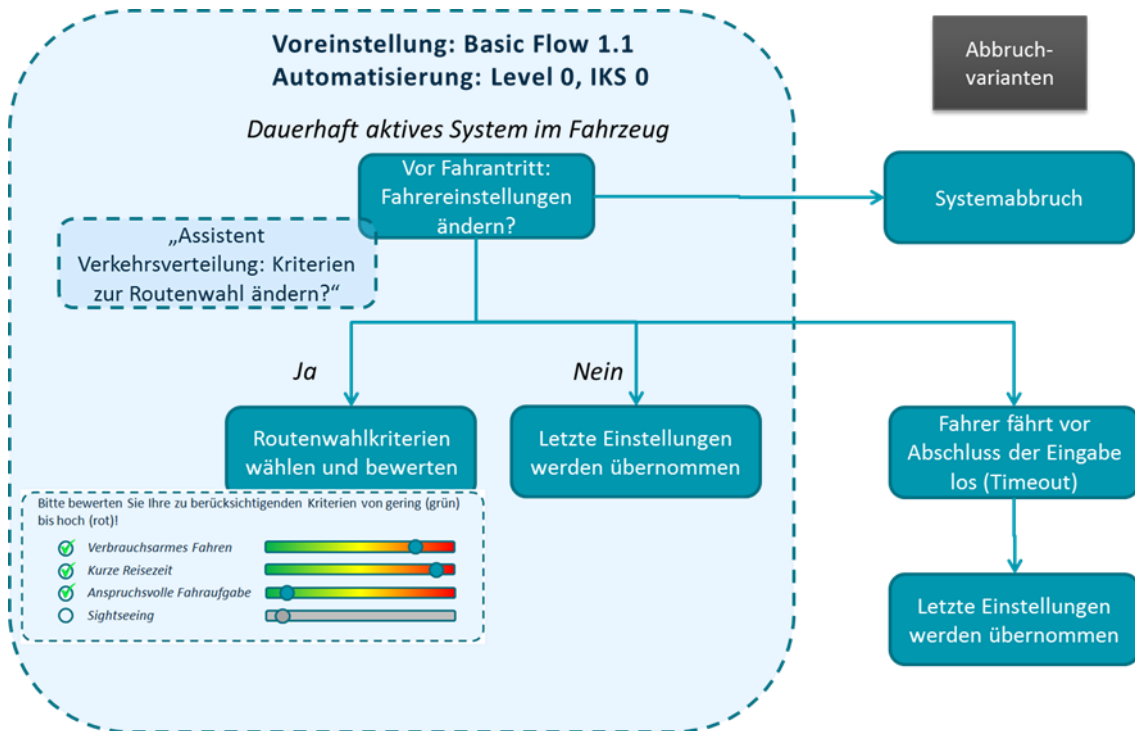


Abbildung 4.6: Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht in Phase „Voreinstellung“ der Funktion F4

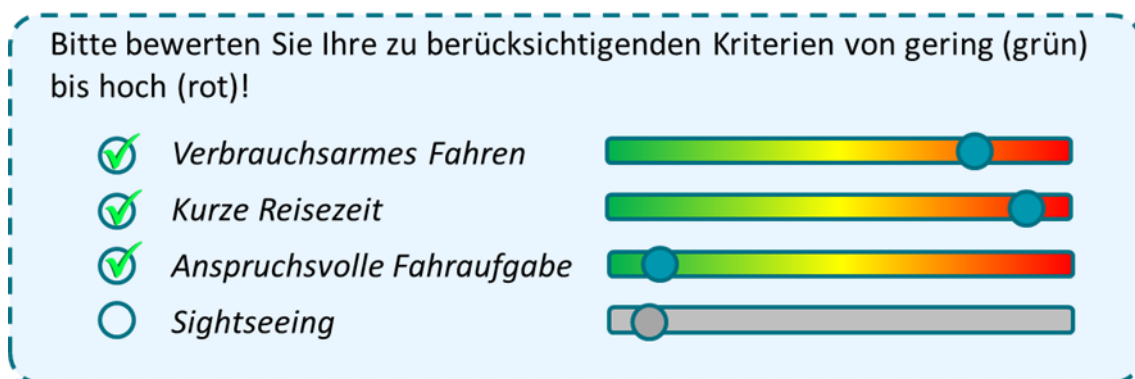


Abbildung 4.7: Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht in Phase „Routenwahlkriterien“ der Funktion F4

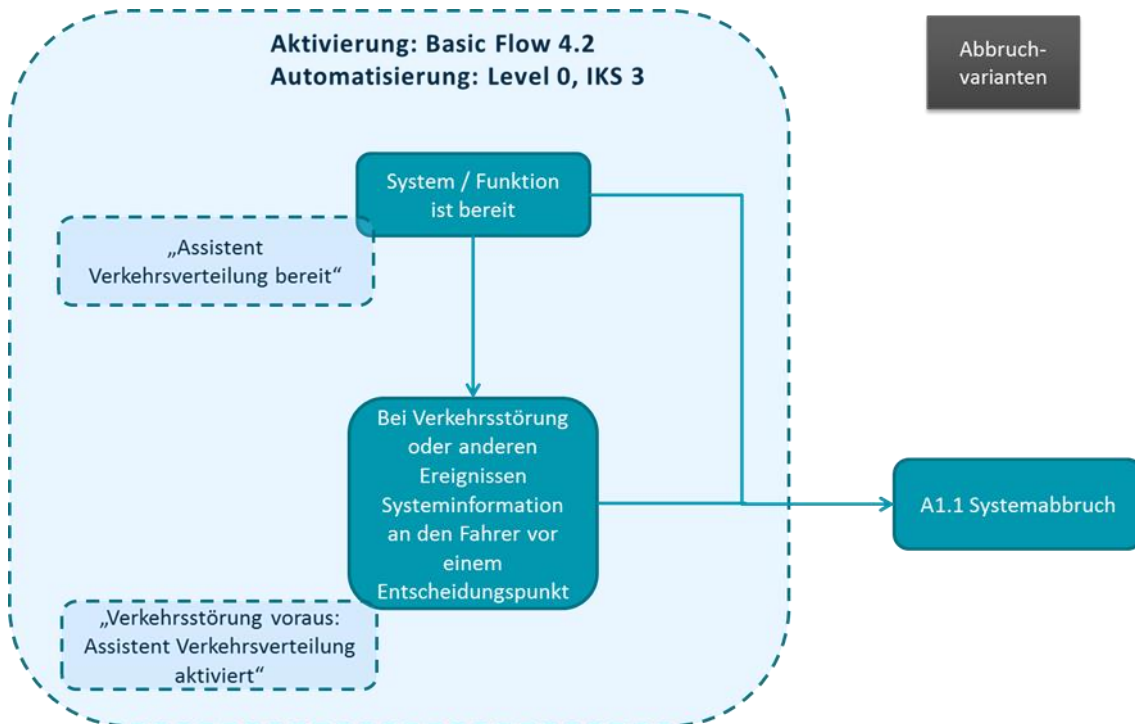


Abbildung 4.8: Interaktionsdiagramm in Phase „Aktivierung“ (Sensierung und Umfeldmodellierung) der Funktion F4

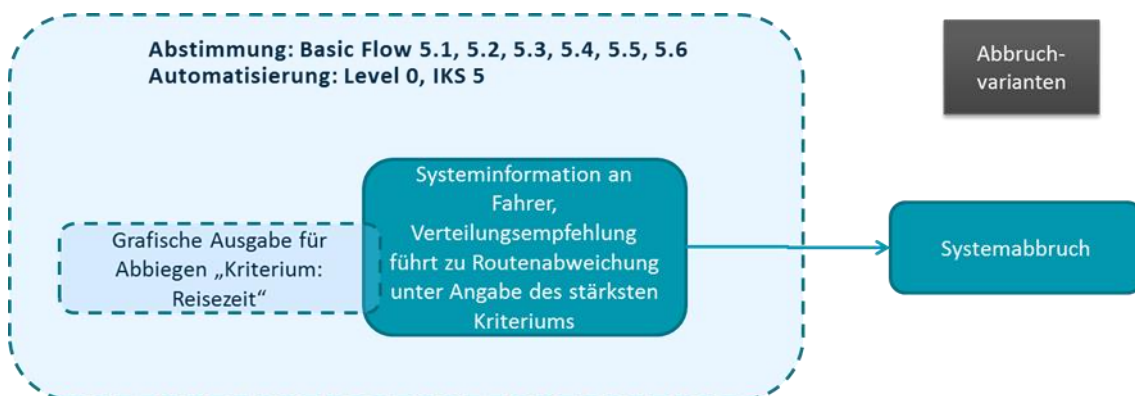


Abbildung 4.9: Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht der Phase „Abstimmung“ (Manöverplanung) der Funktion F4

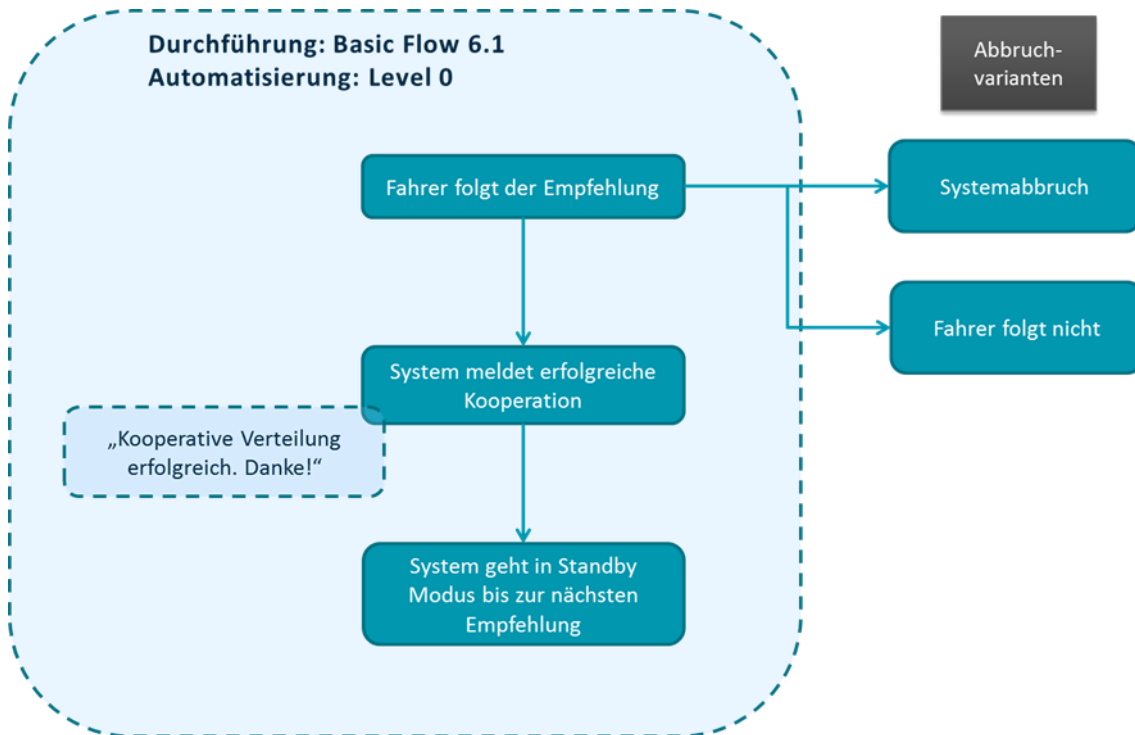


Abbildung 4.10: Interaktionsdiagramm aus Fahrersicht der Phase „Manöverdurchführung“ der Funktion F4

4.2.2 Fahrzeugsicht

1. Routenwahlkriterien wählen, festlegen

Neben den bisher üblichen Kriterien zur Wahl einer Route, wie Reisezeit oder Streckenlänge, sind weitere Routenkriterien auch im Hinblick auf die Entwicklungen zum automatisierten Fahren möglich. 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 anspruchsvolle Fahrtstrecke ein Kriterium sein.

Aufgrund der steigenden Intelligenz und Sensorik im Fahrzeug können auch Kriterien von Relevanz sein, die das Fahrzeug ermittelt. Das Fahrzeug kann zeitliche und örtliche Verhaltensmuster des Fahrers erkennen, wie z.B. die übliche Zeit für den Pendler zur Arbeit, wodurch Kriterien wie Reisezeit eine höhere Gewichtung erhalten, oder das Wissen des Fahrzeugs über den Wohnort des Fahrers beinhalten, wodurch eine Ortskenntnis impliziert werden kann und viele weitere alternative Wege sinnvoll sein können. 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 infolge der vorgegebenen Haltepunkte eingeschränkt, so dass häufig nur sehr bedingt auf Ausweichstrecken ausgewichen werden kann. Ein weiteres Kriterium kann im Fahrzeugstatus bestehen, so dass z.B. bei geringem Tankfüllstand die Routenauswahl auf Strecken, welche eine Tankstelle beinhalten, beschränkt sein kann.

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Strategischer Support
1.1 Routenkriterien wählen	1.1 Routenkriterien wählen	

Tabelle 4.1: Basic Flow in Phase 1 der Funktion F4

Störungen	Alternativen	Folgen
	A1.1 Routenkriterien systembedingt voreingestellt	Keine
	A1.2 Routenkriterien aus Verhaltensweisen und Zeitpunkt generiert	Keine

Tabelle 4.2: Störungen und Alternativen in Phase 1 der Funktion F4

2. Fahrdaten liefern (IKS 2) – Sensierung

Im zweiten Schritt übermitteln die Fahrzeuge Daten an den strategischen Support, die zur Generierung einer Verkehrslage dienlich sind (vgl. Tabelle 4.3/Tabelle 4.4). Dies können z.B. Geschwindigkeiten oder Reisezeiten von Fahrzeugen sein. Die Übertragung dieser Daten kann über Mobilfunk oder über im Straßennetz verteilte IRS erfolgen.

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Strategischer Support
2.1 Fahrdaten (Fahrzeugdaten) übermitteln	2.1 Fahrdaten (Fahrzeugdaten) übermitteln	
		2.2 Fahrdaten (Fahrzeugdaten) empfangen
		2.3 Infrastrukturdaten empfangen

Tabelle 4.3: Basic Flow in Phase 2 der Funktion F4

Störungen	Alternativen	Folgen
S2.1 keine Kommunikationsmöglichkeit		Qualität der Verkehrslage niedriger

Tabelle 4.4: Störungen und Handlungsalternativen in Phase 2 der Funktion F4

3. Verkehrslage und Strategien ermitteln - Umfeldmodellierung

Der Schritt 3 umfasst die Prozesse im Rahmen des strategischen Supports (vgl. Tabelle 4.5/Tabelle 4.6).

Die von den Fahrzeugen übermittelten und die von den Infrastrukturdetektoren vorliegenden Daten werden zu einem gemeinsamen Modell der Verkehrslage fusioniert, so dass Aussagen über die Belastungen und Restkapazitäten auf den Routen getroffen werden können.

Wenn außerhalb von Verkehrsereignissen strategische Routenführungen vorliegen, wie z.B. Verkehrsführungen im Rahmen besonderer Ereignisse wie etwa Messen oder Stadionereignissen, so werden diese zusätzlich übermittelt, da sie entscheidend für die Routenwahl der Besucher dieser Events sind.

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 könnte annähernd genau auf Basis der infrastrukturdetektierten Verkehrsstärke im Verhältnis zu der Anzahl der fahrzeugseitig detektierten Verkehrsstärke ermittelt werden.

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Strategischer Support
		3.1 Fahrzeugdaten und Infrastrukturdaten fusionieren
		3.2 Verkehrslage berechnen
		3.3 Strategische Routenführung ermitteln
		3.4 Optimierte Verteilung des Verkehrs ermitteln
		3.5 Mischverkehrsverhältnis (Ausstattungsrate) aus Fahrdaten und Infrastrukturdaten ermitteln
		3.6 Verkehrsverteilung optimiert für Mischverkehrsverhältnis ermitteln

Tabelle 4.5: Basic Flow in Phase 3 der Funktion F4

Störungen	Alternativen	Folgen
S3.1 Datenmenge zur Ermittlung einer aussagekräftigen Verkehrslage nicht ausreichend	ggf. Verkehrslage auf Basis historischer Daten heranziehen	Qualität der Verteilungsempfehlung verschlechtert sich
	A3.1 keine strategische Routenführung vorhanden	Verteilung erfolgt rein auf Verkehrsbasis

Tabelle 4.6: Störungen und Alternativen in Phase 3 der Funktion F4

4. Handlungsrichtlinie / Verteilungsempfehlung übermitteln (IKS 3) - Manöverabstimmung

Unter der Voraussetzung, dass Kapazitätsengpässe vorliegen oder nahen, wird die an das Mischverhältnis angepasste Verkehrsverteilung an die Fahrzeuge übermittelt (vgl. Tabelle 4.7/Tabelle 4.8).

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Strategischer Support
		4.1 Verteilungsempfehlung (Infrastrukturdaten) übermitteln
4.2 Verteilungsempfehlung (Infrastrukturdaten) empfangen	4.2 Verteilungsempfehlung (Infrastrukturdaten) empfangen	

Tabelle 4.7: Basic Flow in Phase 4 der Funktion F4

Störungen	Alternativen	Folgen
S4.1 keine Kommunikationsmöglichkeit des strategischen Supports		Übertragung der Verteilungsempfehlung nicht möglich
S4.2 keine Kommunikationsmöglichkeit des Fahrzeugs		Verteilung erfolgt nur an einen Teil der Fahrzeuge, Verteilung möglicherweise nicht optimal
S4.3 Ausstattungsrate der Fahrzeuge nicht ausreichend für eine optimierte Verteilung (Mischverkehr)		Verteilung erfolgt nur an den ausgestatteten Teil der Fahrzeuge, Verteilung möglicherweise nicht optimal

Tabelle 4.8: Störungen und Alternativen in Phase 4 der Funktion F4

5. Routenwahl-Manöver kommunizieren und abstimmen (IKS 5) - Manöverplanung

Im fünften Schritt erfolgt zwischen den beteiligten Fahrzeugen eine Abstimmung über die Verteilung auf die Routenalternativen (vgl. Tabelle 4.9). Hierzu ermittelt zuerst jedes Fahrzeug für sich auf Basis der Verteilungsempfehlung, sowie des eigenen Ziels und der Routenkriterien, sowohl fahrer- als auch fahrzeugseitig die geplante Route. Die Entscheidung zur Wahl einer Route wird möglicherweise auf Basis einer Gewichtung der unterschiedlichen Kriterien erfolgen, wodurch z.B. eine prozentuale Präferenz der möglichen Routen generiert wird. Jedes Fahrzeug teilt den Fahrzeugen in seiner unmittelbaren Umgebung seine Manöverabsicht mit, die im minimalen Fall "Abfahren" oder "auf der Hauptroute bleiben" heißen kann. Jedes Fahrzeug empfängt die geplanten Manöver der umliegenden Fahrzeuge und prüft, ob die geplanten Entscheidungen mit der Verteilungsempfehlung übereinstimmen. Bei Abweichungen werden zuerst die Fahrzeuge mit der geringsten Präferenz für die Route, die zu viele Fahrzeuge gewählt haben, einem veränderten Manöver zustimmen. Abschließend wird das Manöver umgesetzt.

Sollte aus einem der in Tabelle 4.10 aufgeführten Gründe eine optimierte Verteilung nicht möglich sein, so wird die Verteilung im nächsten Zeitzyklus justiert und der nächste Fahrzeugpulk agiert auf Basis der neuen Verteilung. Im schlechtesten Fall ändert sich nichts im Vergleich zu den bereits heute auftretenden Verteilungen.

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Strategischer Support
5.1 Ermittlung der Ego Route auf Basis von Verteilungsempfehlung, Ziel und Routenkriterien	5.1 Ermittlung der Ego Route auf Basis von Verteilungsempfehlung, Ziel und Routenkriterien	
5.2 Austausch der Manöverabsicht (Manöverdaten)	5.2 Austausch der Manöverabsicht (Manöverdaten)	
5.3 Vergleich mit Verteilungsempfehlung	5.3 Vergleich mit Verteilungsempfehlung	
5.4 Konflikterkennung	5.4 Konflikterkennung	
5.5 Konfliktauflösung	5.5 Konfliktauflösung	
5.6 Zustimmung zur Entscheidung (Manöverdaten)	5.6 Zustimmung zur Entscheidung (Manöverdaten)	

Tabelle 4.9: Basic Flow in Phase 5 der Funktion F4

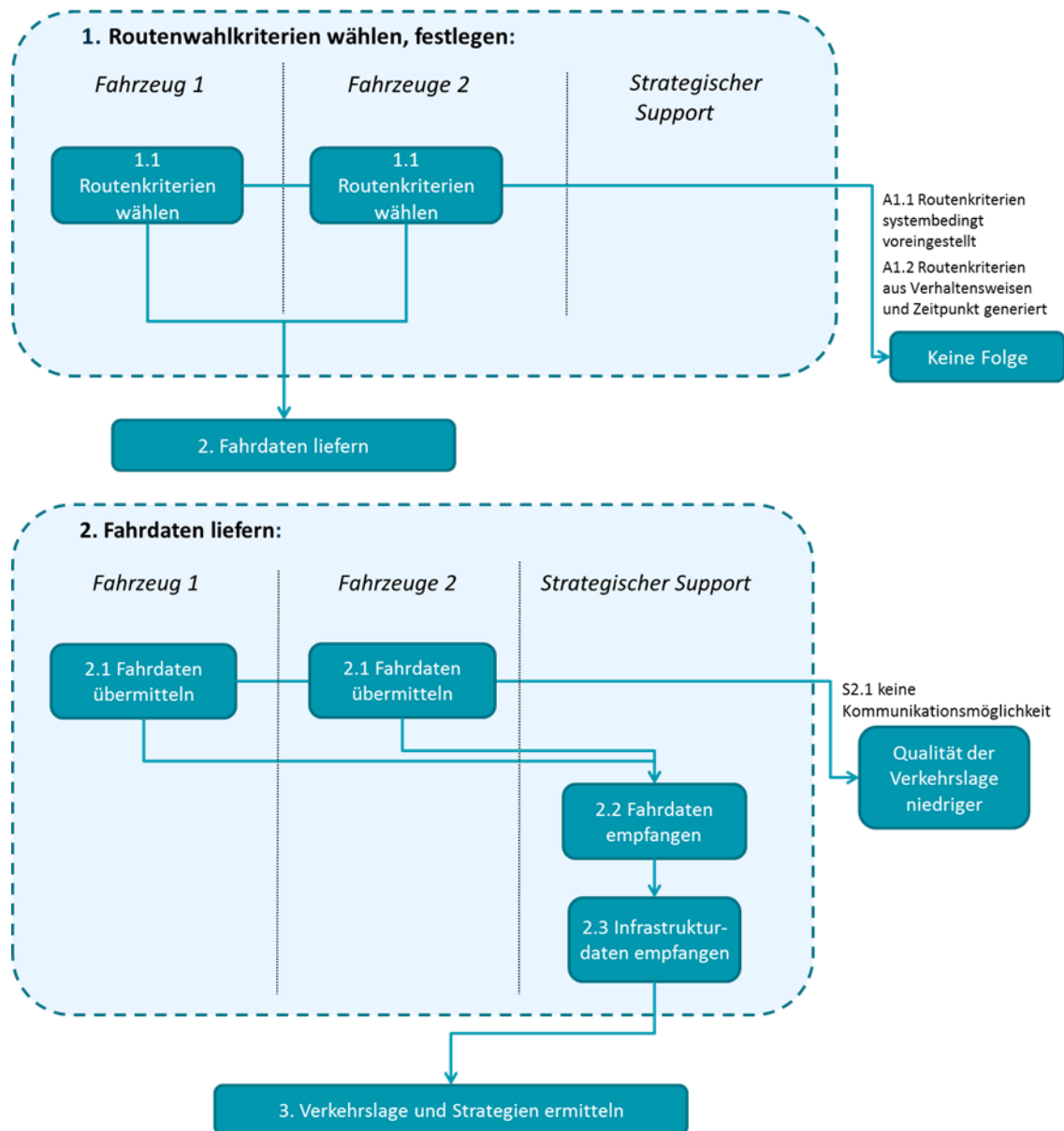
Störungen	Alternativen	Folgen
S5.1 Abriss der Kommunikation		Fahrzeug wird bei der Abstimmung nicht berücksichtigt, kann aber anhand der zuvor empfangenen Verteilungsempfehlung agieren
S5.2 Entscheidungen des Fahrzeugkollektivs nicht mit Verteilungsempfehlung vereinbar		Verteilungsempfehlung des nächsten Zyklus wird korrigiert
S5.3 Entscheidungen des Fahrzeugkollektivs nicht mit eigener Entscheidung vereinbar		Fahrzeug fährt seine Route, Verteilungsempfehlung des nächsten Zyklus wird korrigiert

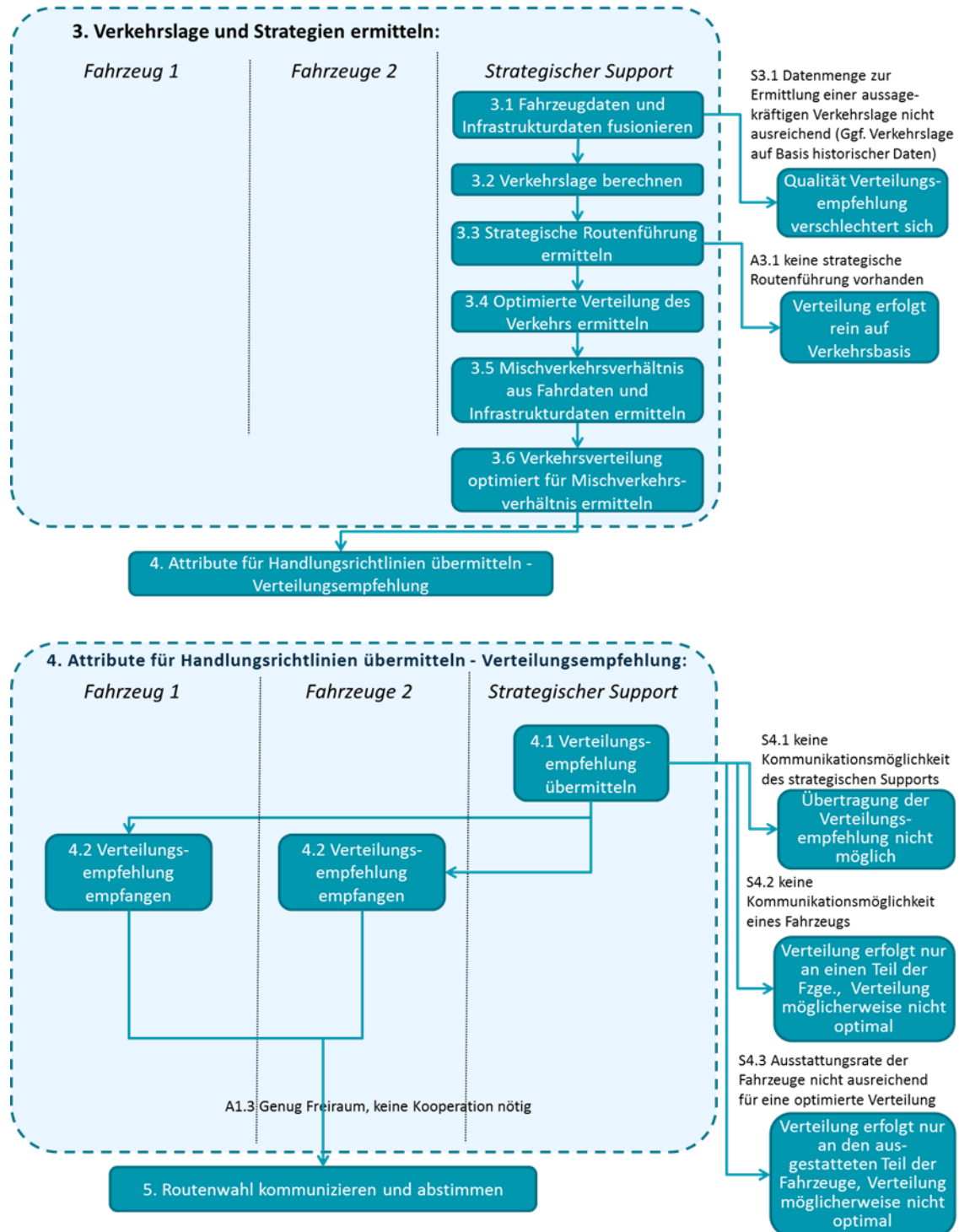
Tabelle 4.10: Störungen und Alternativen in Phase 5 der Funktion F4

6. Manöver durchführen

Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Strategischer Support
6.1 Manöver-Entscheidung wird umgesetzt	6.1 Manöver-Entscheidung wird umgesetzt	

Tabelle 4.11: Basic Flow in Phase 6 der Funktion F4





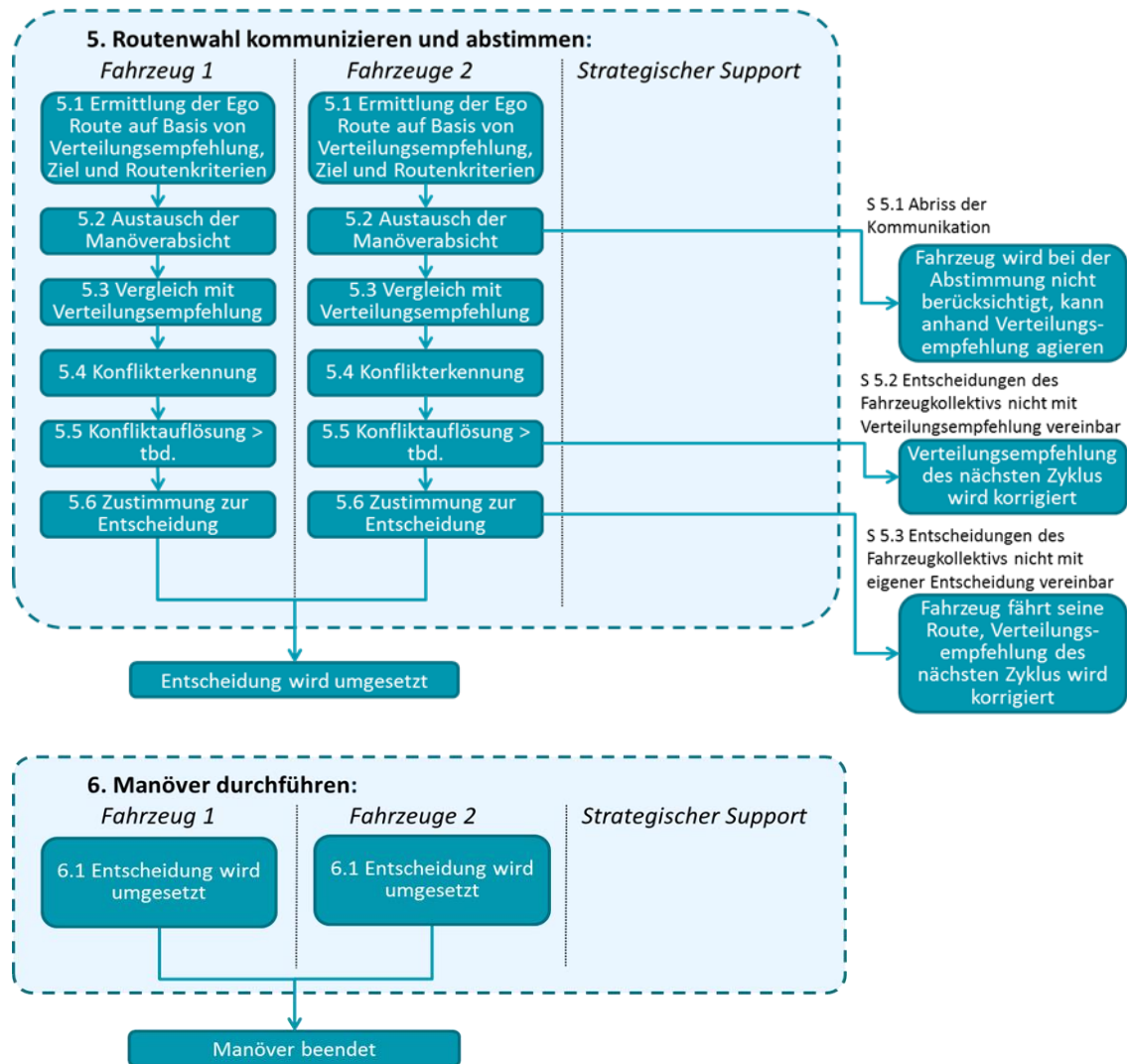


Abbildung 4.11: Interaktionsdiagramme der Funktion F4 aus Fahrzeugsicht

4.3 Gestaltungsempfehlungen bezüglich MMI-Konzept

Mensch-Maschine-Interaktionsschritte im Fahrzeug sind:

- Eingabe von besonderen Fahrpräferenzen (abweichend von der Standardeinstellung) vor Fahrtantritt oder während der Fahrt vor einem Entscheidungspunkt
- Info-Anzeige, dass sich das Fahrzeug in einem Entscheidungspunkt (Anschlussstelle) befindet, d.h. dass das Fahrzeug an diesem Punkt entweder auf der Strecke bleibt oder abfährt.
- Anzeige der Verteilungs- und Fahrempfehlung (unabhängig ob automatisiert oder manuell gefahren wird), ggf. mit Begründung. Dabei muss allerdings nicht zwingend eine Navigationsroute angegeben werden.
- Akzeptanz / Nichtakzeptanz durch Handeln

Zeit- und raumkritische Manöver für eine Abbiegeentscheidung sind ein notwendiger Spurwechsel in den rechten Fahrstreifen sowie die erforderliche Verzögerung auf dem Abbiegefahrstreifen.

4.4 Weitere funktionspezifische Untersuchungsgegenstände

Im Rahmen der Use Case-Analyse wurden durch die Projektpartner eine Reihe von Fragestellungen identifiziert, die über die Perspektive, die TP1 einnimmt, hinaus gehen, die aber für die weitere inhaltliche Ausplanung der folgenden Teilprojekte TP2, TP3, TP4 bzw. TP5 relevant sein könnten:

- Unter welchen Voraussetzungen ist ein Austausch von kooperativen Nachrichten erforderlich? Wann kann auf Teile der Kommunikation verzichtet werden? In welchen Fällen soll mit Abstimmung kooperiert werden?
- Es sind drei Varianten der Kommunikation denkbar: (1) IKS 3 (Austausch von Sensordaten), in der die Verteilungsempfehlung übertragen wird. (2) IKS 4 (Mitteilung der Kooperationsbereitschaft), bei der die Fahrzeug zusätzlich Entscheidungspräferenz und -gewichtungskennwert übertragen. (3) IKS 5 (Abstimmung von Fahrmanövern), welches bei Konflikten zwischen den Entscheidungen und der Verteilungsempfehlung zum Tragen kommt.
- Gibt es Unterschiede bei der Logik / bei der Kommunikation bei verschiedenen Örtlichkeiten? BAB – BAB, BAB – Basisnetz und Basisnetz – Basisnetz? Wie werden mehr als zwei Entscheidungsmöglichkeiten behandelt?
- In welcher Form wird die Verteilungsempfehlung übermittelt (z.B. anteilig in Prozent oder zahlenmäßig als Kfz/min)? Wie kann die normal übliche Verteilung des Verkehrs am Entscheidungspunkt berücksichtigt werden? Ist eine Übertragung dieser ins Fahrzeug erforderlich? Wie können nicht ausgestattete Fahrzeuge bei der Berechnung der Verteilungsempfehlung berücksichtigt werden? Ab welcher Ausstattungsrate können sinnvoll Verteilungsempfehlungen gegeben werden, ohne einen Großteil der ausgestatteten Fahrzeuge abzu-

leiten und damit den Kundennutzen zu minimieren? Wie können nicht ausgestattete Fahrzeuge mit Navigationssystemen, die unabhängig von der Verteilungsempfehlung Entscheidungen treffen, berücksichtigt werden?

- Aktualisierung der Verteilungsempfehlung erfolgt seitens der ICS alle 60 s. Sie wird kontinuierlich an die Fahrzeuge, die auf den Entscheidungspunkt zufahren, übertragen.
 - Wie viele Fahrzeuge können sich sinnvoll abstimmen?
 - Wie erfolgt eine Abstimmung mit womöglich variierender Fahrzeuganzahl?
 - Wie werden Fahrzeugpuls, die sich abstimmen, voneinander abgegrenzt?
 - Sind bzgl. Fahrzeuggruppen gleitende Abstimmungen möglich (z.B. bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten)?
- Überprüfung der Grundannahmen aus Kapitel 4.2.1:
 - Welche Kriterien gibt es für die Entscheidung, ob abgefahren wird oder nicht (für Fall BAB-Ausfahrt)?
 - Wie kann eine sinnvolle Gewichtung für Kriterien aussehen? Wie sieht die Vergleichbarkeit zwischen Fahrzeugen mit unterschiedlicher Art und Anzahl an Entscheidungskriterien aus?
 - Wie können Schwellwerte für die Entscheidung definiert werden (im Fall IKS 3)? Hier ist eine Simulation nötig.

5 FUNKTION 5: KOOPERATIVES ABBIEGEN AUF LANDSTRASSEN

Knotenpunkte auf Landstraßen mit hohen durchschnittlichen und relativen Fahrzeuggeschwindigkeiten sowie unübersichtlicher kurviger Straßenführung stellen hohe Anforderungen an vorausschauende Wahrnehmung und entsprechende Reaktion. Nach aktuellem Stand ist der Fahrer auf die eigene Situationsinterpretation und möglicherweise Lichtsignale angewiesen, um auf das Verhalten und die Intention anderer Verkehrsteilnehmer schließen und reagieren zu können.

Das wird durch grundsätzliche Regeln wie zum Beispiel „Vorfahrt gewähren“ Beschilderung oder „Hauptstraße hat Vorfahrt“ gemäß Straßenverkehrsordnung eingegrenzt. Diese Regeln dienen dem Fahrer dazu, seine Fahrweise entsprechend anzupassen und für klare Verhältnisse zwischen Verkehrsteilnehmern zu sorgen. Die Optimierung des Verkehrs, zum Beispiel hinsichtlich kontinuierlichem Verkehrsfluss, Reduzierung von Bremsmanövern, Fahrmanöverabsicherung durch Sensordatenaustausch oder Warnung bei Gefährdungslagen, wird hierbei nicht betrachtet.

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) übernehmen in diesem Zusammenhang die Verbesserung der Fahrerwahrnehmung und Manöversteuerung. Die fahrzeugeigene Sensorik verbessert die Umweltwahrnehmung für den Fahrer und assistiert bei spezifischen Fahraufgaben. Der Wahrnehmungshorizont des eigenen Fahrzeugs ist jedoch durch die Leistungsfähigkeit der fahrzeugeigenen Sensorik begrenzt. Gerade bei hohen Geschwindigkeiten, auf Landstraßenknotenpunkten mit Kurvenverläufen und dichtem Verkehr stoßen ADAS Systeme aufgrund der Reichweitenbeschränkungen an ihre Grenzen.

Im Rahmen der Funktion 5: *Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen* sollen mit Hilfe von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation Fahrmanöver mehrerer Verkehrsteilnehmer untereinander effizienter und sicherer als bisher dargestellt werden. Dieses kooperative Fahren beginnt bei der Übermittlung eines Abbiegewunsches auf Landstraßen an andere Fahrzeuge zur Erhöhung der Signalisierungsreichweite und reicht bis hin zur gemeinsamen, abgestimmten Planung von Abbiegemanövern.

Basis hierfür ist die kollektive Wahrnehmung der räumlich beteiligten Fahrzeuge über den aktuellen Stand an der jeweiligen Manöverstelle. Diese resultiert aus den ausgetauschten Daten, welche Fahrzeuge, nach dem aktuellen Stand, bereits über ihren eigenen Systemzustand versenden (CAM) und aus noch zu definierenden Umfeldmodell-Telegrammen, welche die Umgebungsdaten aus dem jeweiligen Fahrzeug als Nachricht verschicken.

5.1 Beschreibung

5.1.1 Use Cases und Szenarien

Die kooperativen Szenarien in Funktion 5 sollen sowohl einfache Datenaustausch-Szenarien nach IKS Stufe 1 bis 2 als auch komplexe kooperative Fahrmanöver nach IKS 3 und 4 ermöglichen.

Fahrzeuge, die nicht mit V2X-Technologien ausgestattet sind, werden insofern berücksichtigt, als dass diese in den Umfeldmodell-Telegrammen auftauchen.

Im Rahmen der Funktion F5 werden unterschiedliche Ein- und Abbiegeszenarien auf Landstraßen realisiert. Die Use Case Auswahl erfolgt nach Deliverable D1.1 unter der Maßgabe, möglichst sicherheitskritische und potenziell optimierbare Fahrmanöver auf Landstraßenknotenpunkten darzustellen.

Hierbei stellt im Rechtsverkehr das Linkseinbiegen auf ländlichen geregelten Knotenpunkten hohe Anforderungen an die Verkehrsteilnehmer – insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten, hohem Verkehrsaufkommen sowie nichtlinearem Streckenverlauf und damit einhergehender Sichtbeschränkung.

Aus diesen für den konventionellen Fahrer anspruchsvollen Anforderungen hinsichtlich Situationsverständnis, Interpretation und Reaktion leiten sich die ausgewählten Use Cases in Funktion F5 ab.

Im folgenden Überblick wird die Funktion *Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen* in die Use Cases und darauf basierende Szenarien zerlegt.

Die abgeleiteten Szenarien, welche für diese Use Cases zur Funktionsdarstellung herangezogen werden, leiten sich aus verschiedenen in Deliverable D1.1 dargestellten relevanten Parametern ab. Diese relevanten Einflussfaktoren wie enger Manöverraum, hohe Relativgeschwindigkeiten und große Variabilität von Entscheidungsfaktoren sollen hier untersucht werden.

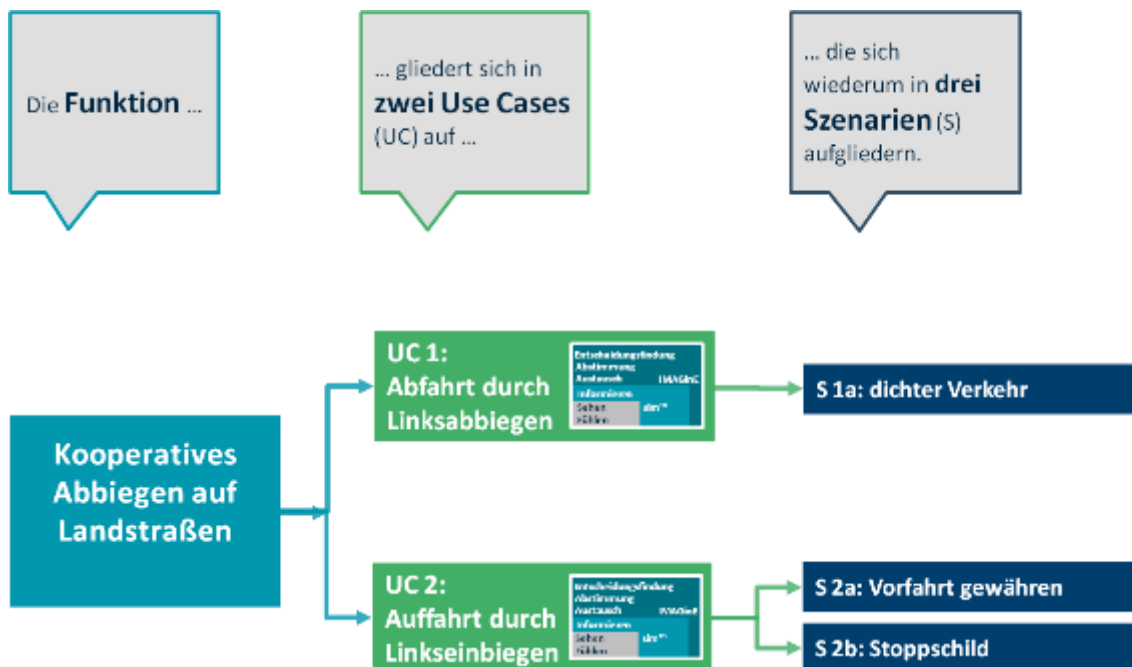


Abbildung 5.1: Funktionsbaum für Funktion F5 „Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen“

Abfahrt durch Linksabbiegen

In Use Case 1 (UC1) *Abfahrt durch Linksabbiegen* soll ein Fahrzeug auf der Hauptfahrbahn nach links in eine Nebenstraße einbiegen (vgl. Abb. 5.2). Dabei kreuzt das Fahrzeug in dem betrachteten Szenario eine Gegenfahrbahn mit dichtem Verkehr. Ein kooperatives Manöver in einer solchen Situation besteht darin, mit dem entgegenkommenden Verkehr zu verhandeln. Ziel ist, dass ein Kooperationspartner die Geschwindigkeit so reduziert, dass eine ausreichend große Lücke für das Überfahren der Gegenfahrbahn aufgemacht wird, ohne dass hierbei der Verkehrsfluss wesentlich gestört wird. Das heißt Rückstauungen in den Fahrspuren können vermieden werden, gleichzeitig können aber auch Sicherheitsreserven im Manörraum beachtet werden. Bei diesem Manöver wird in der ersten Ausprägung (später Geschwindigkeitsreduzierung mehrerer) ein geeigneter Kooperationspartner ermittelt, der durch Geschwindigkeitsreduktion nach dem Kooperationspartner in die Kreuzung einfährt, so dass der Initiator des Manövers die Gegenfahrbahn gefahrlos überqueren kann. Eine Metrik für die Durchführung des Manövers könnte entweder die maximal reduzierte Geschwindigkeit oder der kumulierte Zeitverlust aller Beteiligten sein.

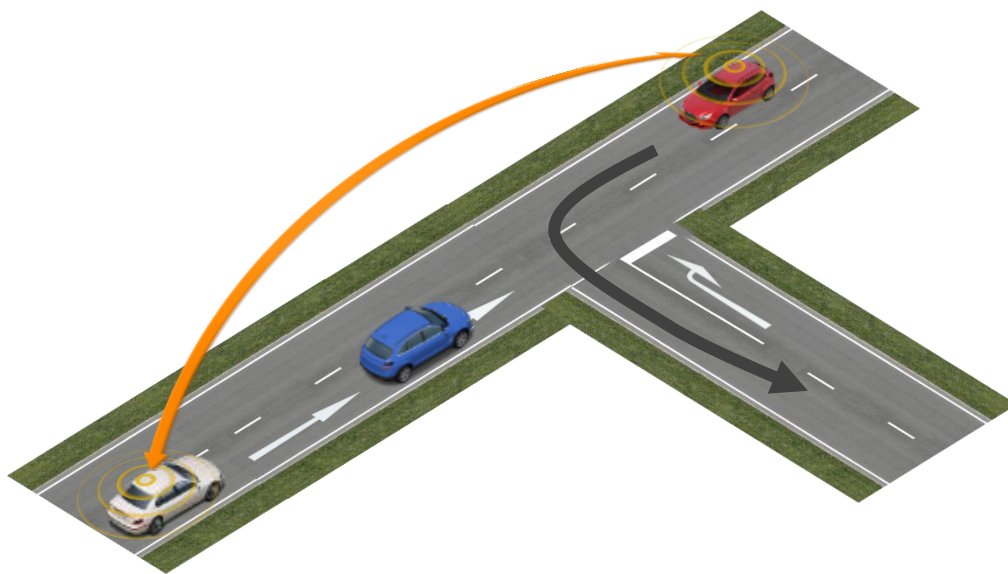


Abbildung 5.2: Darstellung des Use Case „Abfahrt durch Linksabbiegen“ der Funktion F5

Auffahrt durch Linkseinbiegen

In dem Use Case 2 (UC2) *„Auffahrt durch Linkseinbiegen“* fährt ein Fahrzeug aus einer Nebenstraße auf eine stark befahrene Hauptstraße. In diesem Use Case wird die erste Fahrbahn der Hauptstraße gekreuzt, um auf die zweite Fahrbahn in entgegengesetzter Richtung aufzufahren. Dadurch wird mit dem Verkehr von beiden Seiten kommuniziert, um zum richtigen Zeitpunkt eine Lücke für das Abbiegemanöver zu öffnen. Der Use Case wird in zwei Szenarien differenziert. Das erste Szenario, dargestellt in Abbildung 5.3, beschreibt den allgemeinen Fall der Kreuzungsregelung mit einem „Vorfahrt beachten“-Schild, das zweite Szenario in Abbildung 5.4 die Regelung anhand eines Stopp-Schildes.

Beim ersten Szenario kann das Fahrzeug, ohne zum Stillstand zu kommen, nach kooperativer Abstimmung und Manöverplanung in die Kreuzung einfahren. Beim zweiten Manöver besteht die Herausforderung, nach Stillstand an der Stopplinie einen geeigneten Auffahrraum abzustimmen - unter Berücksichtigung des dafür nötigen Beschleunigungsvermögens des auffahrenden Fahrzeugs.

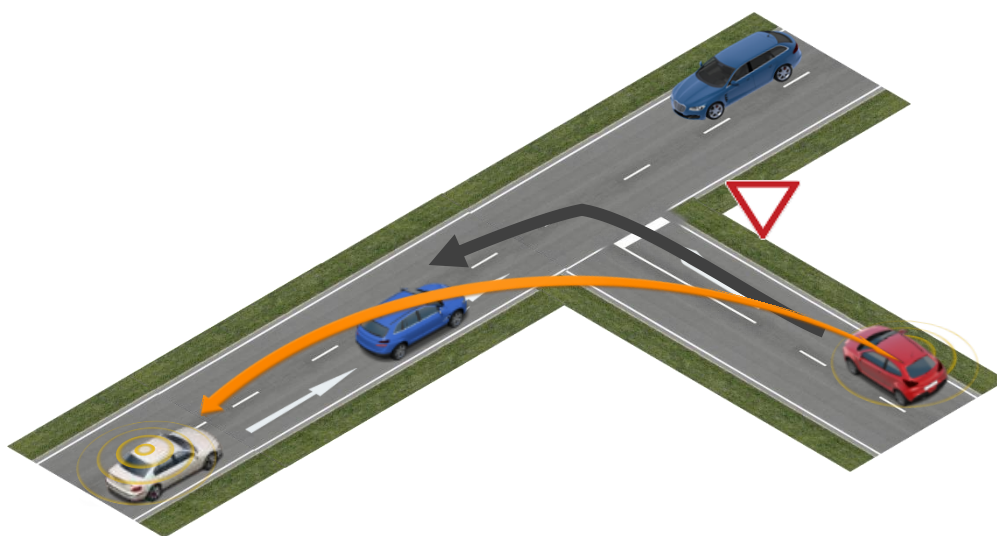


Abbildung 5.3: Auffahrt durch Linkseinbiegen - Vorfahrt Beachten Regelung

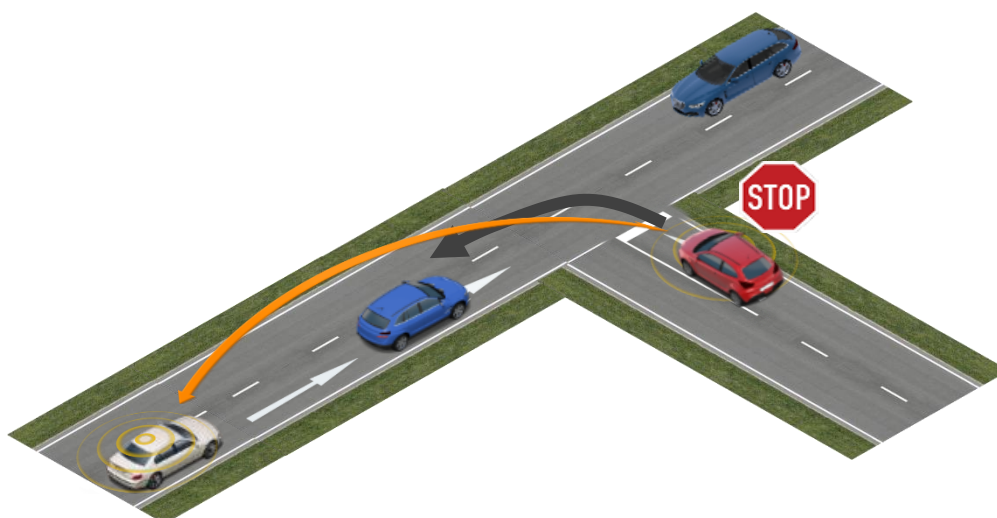


Abbildung 5.4: Auffahrt durch Linkseinbiegen – Stopp-Schild Regelung

5.1.2 Priorisierung von Use Cases und Szenarien

Im Rahmen von IMAGinE wird der Use Case 2 „Auffahrt durch Linkseinbiegen - Vorfahrt Beachten Regelung“ implementiert und untersucht. Diese Auswahl soll erfahrungsgemäß die Abbildung einer möglichst repräsentativen Stichprobe besonders sicherheitskritischer und potenziell optimierbarer Fahrmanöver auf Landstraßenknotenpunkten sicherstellen, wodurch in dem durch das Gesamtprojekt gegebenen Rahmen der größtmögliche Erkenntnisgewinn erzielt werden soll.

5.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung

Zusätzliche Funktionsdetails werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Ausprägung	Beschreibung
Use Case Beteiligte	Ein-/Abbiegendes Fahrzeug, beteiligte Fahrzeuge (mindestens 2 IKS 2-3 Fahrzeuge, 1 passiv)
Kurzbeschreibung	Assistiertes Abbiegemanöver auf der Landstraße, V2X Kommunikation + sensorische Umfelderkennung erweitert Einzelumfeld auf gemeinsamen Manöverraum → höhere Informationsdichte, exaktere kooperative Fahrmanöverplanung und -durchführung
Nicht kooperatives Manöver	Abbiegendes Fahrzeug muss aufgrund nicht kooperativen Verhaltens abbremsen – Bildung Rückstau
Kooperatives Manöver	Austausch Umfelddaten, Abbildung Manöverraum über alle Beteiligte; Gemeinsame Entscheidungsfindung und Manöverplanung (Abstandsregelung, Trajektorienplanung, Geschwindigkeitsanpassung), Aktuatorikregelung sowie MMI Indikation
Mögliche Störungen	Geplantes Manöver wird verzögert/geändert durch manuellen Eingriff (Lenkung/Bremsen), passiver Partner führt unvorhersehbares Manöver aus (Intentionsfehlererkennung)
Automatisierungsgrad	SAE 1-3
MMI	Entschlussfindung muss nach außen zu den im Manöverraum befindlichen Verkehrsteilnehmern signalisiert werden sowie nach innen um den Fahrer zu beeinflussen
Geschwindigkeitsbereiche	0-100 km/h; 70 km/h bei Verflechtungsbereichen
Kooperationspartner	2-3 im Basismanöver, erweiterte Szenarien mit mehr Teilnehmern inkl. verschiedener IKS möglich
Benötigte Kommunikationsreichweite	Geschwindigkeitsabhängig, insb. im Sichtbereich interessant für MMI Kooperation (visuelle Signalisierung), außerhalb Sichtbereichs interessant für Warnung

Tabelle 5.1: Detaillierung der Funktion F5

Um das praktische Verständnis der Use Cases zu erhöhen, wird im Folgenden anhand einiger Modellannahmen der räumliche und zeitliche Ablauf eines Abbiegemanövers näher beschrieben und mit Zahlenbeispielen unterlegt.

Die Beispielrechnung geht von einfachen physikalischen Bewegungsgleichungen aus und vernachlässigt Effekte wie z.B. eingeschränkte Sichtverhältnisse oder Beeinflussung durch einen Fahrer.

Zunächst werden einige Annahmen getätigt, die den Ausgangszustand der Situation beschreiben sollen und einige Parameter beispielhaft definieren. Die genaue Auslegung und Festlegung der Wertebereiche der Parameter erfolgt im weiteren Verlauf des Projektes. Ein beispielhafter Ablauf der Funktion 5 sieht folgendermaßen aus:

- Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn fahren mit einer Richtgeschwindigkeit von 100 km/h.
100 km/h ist die maximale Geschwindigkeit, bei der der Use Case aktiv werden könnte, auch wenn an vielen Einmündungen auf Landstraßen ein Tempolimit von z.B. 70 km/h gilt.
- Als V2X Technologie wird ITS-G5 angenommen, dessen Reichweite im Szenario mit 600 m abgeschätzt wird (unter idealen Bedingungen).
- Kurven werden mit maximal 20 km/h gefahren.
- Der Teil der Abbiegespur, der mit der Gegenfahrbahn überlappt, wird mit 20 m angenommen. (Die Länge von der Haltelinie bis zur Zielfahrbahn)
- Fahrzeuge beschleunigen komfortabel mit 2 m/s^2 .
- Ausrollende Fahrzeuge (Motorschleppmoment) verzögern mit -0.5 m/s^2 .
- Komfortable Bremsungen werden mit einer Verzögerung von -2 m/s^2 angenommen.
- Für das Szenario „Linksabbiegen“ wird angenommen, dass das abbiegende Fahrzeug zuerst im fließenden Verkehr mitschwimmt und dann die Links-Kurve mit maximal 20 km/h befährt. Es verzögert dabei komfortabel.
- Für das Szenario „Linksauffahren“ wird angenommen, dass das abbiegende Fahrzeug aus der Nebenrichtung mit 100 km/h auf die Einmündung zufährt, komfortabel verzögert, mit maximal 20 km/h um die Kurve fährt und dann bis auf die Richtgeschwindigkeit beschleunigt.
- Die Dauer für eine kooperative Situationserkennung und Abstimmung wird mit 1 s angenommen.
- Der normale Abstand zwischen Fahrzeugen in Kolonnenfahrt wird mit einer Zeitlücke von 2 s angenommen.
- Der Sicherheitsabstand für das Queren einer Fahrbahn zu den dort fahrenden Fahrzeugen wird mit einer Zeitlücke von 1 s angenommen.

- Es wird angenommen, dass kooperierende Fahrzeuge nicht über ihre Anfangsgeschwindigkeit hinaus beschleunigen. Dies ist bei ACC Systemen aus Sicherheitsgründen verboten. Falls ein menschlicher Fahrer fährt, könnte er aufgefordert werden, den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu verringern und somit das Manöver zu unterstützen.

Auf Basis dieser Annahmen kann die Zeit berechnet werden, die das abbiegende Fahrzeug zum Queren der Gegenfahrbahn benötigt:

- Ein stehendes Fahrzeug benötigt für das Befahren der Kurve (beschleunigte Bewegung 20 m, maximale Geschwindigkeit 20 km/h) **tCurve0 = 5.0 s**. (nach 2.9 s erreicht es seine maximale Kurvengeschwindigkeit)
- Das bedeutet, dass zwischen den Fahrzeugen auf der zu kreuzenden Fahrbahn eine Lücke von minimal 5.0 s bestehen muss. Mit Einbeziehung einer zusätzlichen Sicherheitsreserve resultiert eine Lücke von **tLücke0 = 6.0 s**.
- Im Optimalfall (kein Stillstand, Fahrzeug hat bereits Kurvengeschwindigkeit) werden für das Befahren der Kurve nur **tCurveS = 3.6 s** benötigt. Mit Einbeziehung einer zusätzlichen Sicherheitsreserve resultiert eine Lücke von **tLückeS = 4.6s**.

Ein abbiegendes Fahrzeug kann folglich unter den getroffenen Annahmen immer gefahrlos eine Fahrbahn kreuzen, wenn sich eine Lücke von 6 s im Verkehr ergibt, bei optimalen Bedingungen genügen bereits 4.6 s.

UC1 Abfahrt durch Linksabbiegen

Im Folgenden wird der Optimalfall betrachtet, bei dem die Choreografie der Fahrzeuge es erlaubt, dass das abbiegende Fahrzeug nicht zum Stillstand kommen muss. Falls dieser Fall nicht vorliegt, wird z.B. der benötigte Manöverraum größer.

Das Linksabbiegen stellt sich für das abbiegende Fahrzeug relativ einfach dar. Inklusiv der Zeit für die Kooperationsabstimmung benötigt es für die komfortable Verzögerung von 100 km/h auf 20 km/h eine Strecke von 185 m oder 11 s Zeit. Dies entspricht einer Fahrt von 1 s Dauer mit Richtgeschwindigkeit und einer anschließenden konstanten Verzögerung bis zur Zielgeschwindigkeit von 20 km/h.

Damit eine Lücke entstehen kann, muss das kooperierende Fahrzeug seinen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug von ursprünglich 2 s auf 4.6 s vergrößern. Dazu muss es seine Geschwindigkeit verringern. Zwei Varianten sind hierbei denkbar: Das kooperierende Fahrzeug rollt aus, oder es bremst eine kurze Zeit und fährt dann mit konstanter Geschwindigkeit:

- Variante 1 ($a = -0.5 \text{ m/s}^2$): für eine Lücke von insgesamt 4.6 s wird eine Strecke von 428 m oder ein Zeitraum von 18 s benötigt. Die benötigte Strecke setzt sich aus einer Fahrt von 1 s Dauer mit Richtgeschwindigkeit und einer anschließenden konstanten Verzögerung bis zum Erreichen der Kreuzung zusammen. Die Geschwindigkeit bei Erreichen der Kreuzung beträgt 69 km/h. Das heißt, der Abstand der Fahrzeuge zu Beginn des Manövers beträgt:

$$428 \text{ m} + (185 \text{ m} + (18 \text{ s} - 11 \text{ s}) \cdot 100 \text{ km/h} / 3.6) = 807 \text{ m}$$

- Variante 2: ($a=-2 \text{ m/s}^2$): Nach der Fahrt mit Richtgeschwindigkeit während der Manöverabstimmung besteht die Möglichkeit einer freien Festlegung der Dauer des Bremsvorgangs, bevor anschließend mit konstanter Geschwindigkeit gefahren wird. Wird über einen Zeitraum von 3.1 s verzögert, so ist nach 14 s oder 323 m die geforderte Lücke von 4.6 s erreicht, die Endgeschwindigkeit beträgt 78 km/h. Das heißt, der Abstand der Fahrzeug zu Beginn des Manövers beträgt:

$$323 \text{ m} + (185 \text{ m} + (14 \text{ s} - 11 \text{ s}) \cdot 100 \text{ km/h} / 3.6) = 591 \text{ m}$$

Kürzere Bremszeiten führen zu höheren Endgeschwindigkeiten, benötigen dafür jedoch mehr Zeit und Raum.

Auf vielen deutschen Landstraßen finden sich an Einmündungen Geschwindigkeitsbegrenzungen von 70 km/h. Dementsprechend lauten die Eckwerte für den Fall einer Richtgeschwindigkeit von 70 km/h:

- abbiegendes Fahrzeug: Verzögerung von 70 km/h auf 20 km/h in 87 m oder 7 s
- Variante 1 ($a = -0.5 \text{ m/s}^2$): zum Aufbau einer Lücke von insgesamt 4.6 s werden 247 m bzw. 15 s benötigt. Die Geschwindigkeit bei Erreichen der Kreuzung beträgt 44 km/h. Das heißt der Abstand der Fahrzeug zu Beginn des Manövers beträgt:

$$247 \text{ m} + 87 \text{ m} + (15 \text{ s} - 7 \text{ s}) \cdot 70 \text{ km/h} / 3.6 = 489 \text{ m}$$

- Variante 2: ($a=-2 \text{ m/s}^2$): Wird für eine Dauer von 2 s verzögert, so ist nach 14 s oder 235 m die Lücke von 4.6 s erreicht, die Endgeschwindigkeit beträgt 56 km/h. Das heißt der Abstand der Fahrzeug zu Beginn des Manövers beträgt:

$$235 \text{ m} + 87 \text{ m} + (14 \text{ s} - 7 \text{ s}) \cdot 70 \text{ km/h} / 3.6 = 485 \text{ m.}$$

Die Werte zeigen, dass Variante 1 bei einer Richtgeschwindigkeit von 100 km/h aufgrund der beschränkten Reichweite von V2X nicht praktikabel ist. Bei 70 km/h ist sie möglich, führt jedoch im Vergleich zur Variante 2 zu einer um 12 km/h geringeren Geschwindigkeit bei Erreichen der Kreuzung.

Obwohl aktives Bremsen zunächst unattraktiv erscheint, so weist es doch den Vorteil auf, dass die Geschwindigkeit des kooperativen Fahrzeugs an der Kreuzung letztlich höher ist und somit die Auswirkungen auf den rückwärtigen Verkehr geringer sind, weshalb anschließend weniger stark auf die alte Zielgeschwindigkeit beschleunigt werden muss. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass mit der Bremsdauer und/oder Bremsstärke Freiheitsgrade vorhanden sind, mit denen die Manöver der Fahrzeuge feiner aufeinander abgestimmt werden können.

Bei der Wahl der Parameter ist die jeweilige IKS bzw. der Fahrzustand (manueller oder automatisierter Betrieb) zu berücksichtigen. Möglicherweise kann dem Fahrer z.B. nicht verständlich gemacht werden, dass Bremsen besser sein kann als ausrollen.

Mit Variante 2 und einer Richtgeschwindigkeit von 100 km/h lässt sich nun ein Beispiel darstellen, bei dem die angenommene Reichweite von 600 m für V2X voll ausgenutzt wird. Die Manöver sind so aufeinander abzustimmen, dass das abbiegende Fahrzeug ohne Stillstand um die

Kurve fahren kann, so dass die Lücke nur 4.6 s betragen muss. Anmerkung: Falls keine Lücke entstanden sein sollte, gibt es für das abbiegende Fahrzeug noch genug Reserven, um mit einer stärkeren Bremsung zum Stillstand zu kommen.

- Bei 600 m sehen sich die Fahrzeuge im Funk ($t=0s$), das abbiegende Fahrzeug hat z.B. 268 m Abstand zu Kreuzung, das kooperierende 323 m.
- Direkt nach dem Aushandeln des Manövers ($t=1 s$) beginnt das kooperierende Fahrzeug zu bremsen, bis es eine Geschwindigkeit von 78 km/h erreicht hat und bewegt sich anschließend mit konstanter Geschwindigkeit weiter
- 2 s nach dem Aushandeln des Manövers ($t=3 s$) beginnt das abbiegende Fahrzeug bis zum Erreichen der Kurvengeschwindigkeit zu verzögern.
- 8 s nach Beginn des Manövers ($t=9 s$) sollte das dem kooperierenden Fahrzeug voraus fahrende Fahrzeug gerade die Kreuzung verlassen haben, so dass das abbiegende Fahrzeug nun eine freie Strecke vor sich hat.
- 1 s nachdem das abbiegende Fahrzeug auf die Zielfahrbahn abgebogen ist ($t = 14 s$), erreicht das kooperierende Fahrzeug die Kreuzung und kann wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigen.

Der Abstimmungsablauf bei der Kooperation könnte so aussehen, dass das abbiegende Fahrzeug den frühestmöglichen Zeitpunkt mitteilt, bis zu dem es an der Kreuzung eintreffen kann. Das kooperierende Fahrzeug wird seine Fahrstrategie im Rahmen seiner Möglichkeiten (z.B. unter Berücksichtigung einer minimal erlaubten Endgeschwindigkeit) darauf einstellen und dem abbiegenden Fahrzeug seine Ankunftszeit mitteilen. Das kann entweder dazu führen, dass dieses in der Folge entweder einige Sekunden an der Haltelinie warten muss, oder dass es stattdessen weniger stark verzögert und durch Ausrollen Energie sparen kann. Die Abstimmung zwischen den Fahrzeugen sollte dabei so früh wie möglich stattfinden, also sobald die Fahrzeuge in Funkreichweite sind. Je eher dies der Fall ist, desto mehr Möglichkeiten ergeben sich für eine Optimierung des Manövers für alle Kooperationspartner.

Es zeigt sich, dass auch in diesem Optimalfall das kooperierende Fahrzeug seine Geschwindigkeit um deutlich mehr als 20 km/h reduzieren muss. Wenn z.B. die Reichweite geringer ist, oder die Abstände der Fahrzeuge zur Kreuzung nicht optimal sind, wird die Geschwindigkeitsreduktion noch größer ausfallen müssen.

UC2 Auffahrt durch Linksabbiegen

Bei UC2 muss das auffahrende Fahrzeug einmal die von links kommende Fahrspur queren. Dafür gelten die gleichen Betrachtungen wie für UC1.

Zusätzlich besteht die Anforderung, dass nach dem Einfahren auf die Zielfahrbahn das abbiegende Fahrzeug auf die Endgeschwindigkeit des dort fließenden Verkehrs beschleunigen muss. Folglich muss auch hier eine ausreichende Lücke entstanden sein, damit das abbiegende Fahrzeug beschleunigen kann.

Für den von rechts kommenden Verkehr gestaltet sich die Abschätzung etwas schwieriger als in UC1. Im Folgenden gilt die Annahme, dass das abbiegende Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit von mindestens 80 km/h beschleunigen soll.

Außerdem wird der einfachere Fall betrachtet, dass das abbiegende Fahrzeug steht. In Anbetracht der komplexen Choreografie mit Beteiligung von drei Fahrzeugen erscheint dieser Fall als der wahrscheinlichste.

- Das abbiegende Fahrzeug muss auf die Geschwindigkeit des fließenden Verkehrs beschleunigen. (z.B. von 0 auf 80 km/h, wofür 11 s benötigt werden).
- Der von rechts kommende Verkehr muss eine passende zeitliche Lücke schaffen und sich zusätzlich auf die Geschwindigkeit des abbiegenden Fahrzeugs adaptieren.
- Je größer dabei die Lücke ist, desto stärker kann das abbiegende Fahrzeug beschleunigen, aber desto geringer ist die Endgeschwindigkeit des von rechts kommenden Verkehrs zur Schaffung der Lücke, bzw. umso höher ist die benötigte Distanz.
- Ein Arbeitspunkt ist z.B.: das abbiegende Fahrzeug beschleunigt auf 80 km/h und benötigt dafür 11 s. Für den Aufbau der entsprechenden Lücke inklusive einer Sicherheitsmarge von 1 s benötigt der von rechts kommende Verkehr eine Strecke von 1180 m oder einen Zeitraum von 53 s und erreicht ebenfalls eine Endgeschwindigkeit von 80 km/h. Unter diesen Bedingungen würde der Abstand der Fahrzeuge am Treffpunkt 1 s betragen, wodurch der vorgeschriebene Sicherheitsabstand unterschritten würde. In der Praxis wird das abbiegende Fahrzeug aber weiter beschleunigen, so dass der Abstand rasch wieder ansteigt.
- Wird eine Funkreichweite von 600 m angenommen, dann muss bereits vorab eine Lücke zwischen den von rechts kommenden Fahrzeugen von 7.3 s bestehen, um sicherzustellen, dass die Endgeschwindigkeit nicht unter 80 km/h sinkt.
- Wird eine Funkreichweite von 600 m angenommen und es besteht keine über das vorgeschriebene Maß hinausgehende Lücke, so sinkt die Endgeschwindigkeit auf 68 km/h.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass UC2 noch höhere Anforderungen an die Koordination des Manövers stellt. Abgesehen davon, dass sich drei Teilnehmer abstimmen müssen, dauert es relativ lange, das abbiegende Fahrzeug in den fließenden Verkehr zu integrieren.

Bei beiden Use Cases UC1 und UC2 sollte auch der nachfolgende Verkehr mit einbezogen werden. Wenn z.B. die kooperierenden Fahrzeuge die letzten einer Kolonne sind, dann sollte kein kooperatives Manöver stattfinden. Stattdessen ist es besser, das abbiegende Fahrzeug einige Sekunden warten zu lassen. Im Gegensatz z.B. zu Auffahren auf eine Autobahn ist hier Warten eine akzeptable und sichere Alternative.

5.2 Funktionszerlegung

In der folgenden Abbildung ist der generelle Manöverablauf dargestellt. Ausgehend von der Situationserkennung und -bewertung wird in dem nächsten Schritt ein kooperatives Manöver via Broadcast Verfahren angefragt und ein oder mehrere geeignete Kooperationspartner ermittelt.

Mit diesen wird multilateral das Manöver abgestimmt. Zum Schluss wird das Manöver dann unter Berücksichtigung des umgebenden Verkehrs durchgeführt und überwacht.

Der Funktionsablauf ist dabei für alle Use Cases gleich. Nur die Anzahl der Kooperationspartner, mit denen Manöver abgestimmt werden, unterscheidet sich: Beim Linksabbiegen reicht ein Kooperationspartner aus dem entgegenkommenden Verkehr. Beim Linksauffahren werden im dichten Verkehr Kooperationspartner aus beiden Richtungen der Hauptfahrbahn benötigt.

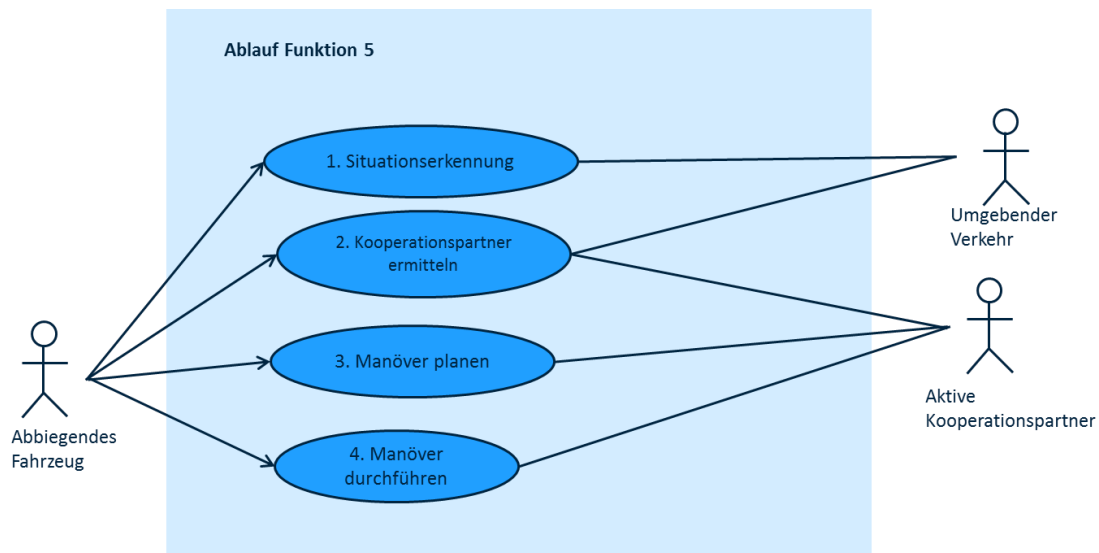


Abbildung 5.5: Schritte des Ablaufs von Funktion F5

In den einzelnen Schritten sind aus Fahrzeugsicht Arbeitsaufgaben aus folgenden Phasen einer Verarbeitungskette nötig:

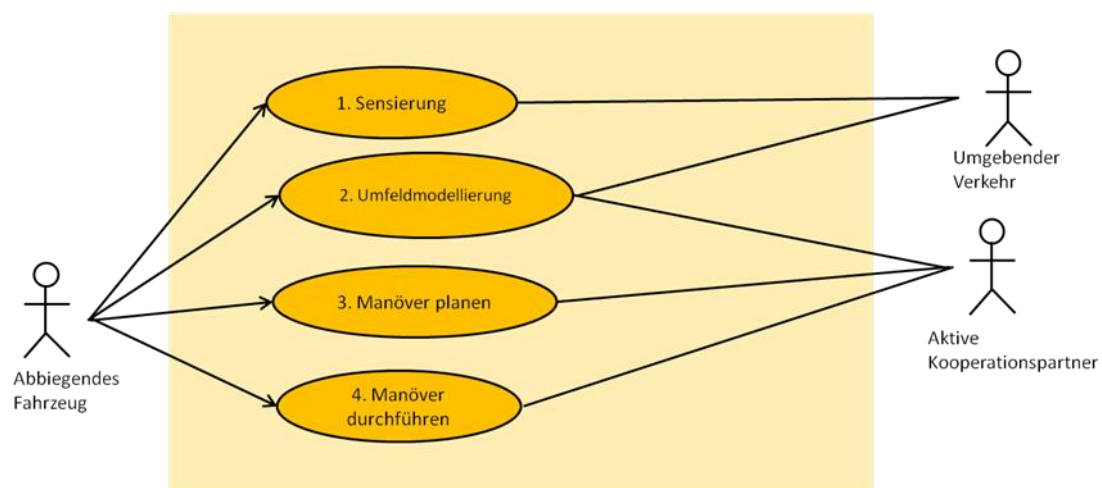


Abbildung 5.6: Big Picture Funktion F5 „Kooperatives Abbiegen auf Landstraßen“

Die Arbeitsphasen 1 und 2 sind dabei eng miteinander verbunden, da die Sensierung den Input für die Umfeldmodellierung liefert. Umfeldmodellierung findet permanent in jedem der zeitlichen Ablaufschritte statt. Die Phase 3 „Manöver planen“ findet sich vor allem in den Schritten 2 und 3 wieder.

Phase 4 „Manöver durchführen“ ist für den Schritt 4 „Manöver durchführen“ relevant.

Der Ablauf wird im Folgenden sowohl aus Fahrersicht als auch aus Systemsicht konkretisiert, da hier jeweils unterschiedliche Aspekte differenziert betrachtet werden müssen.

5.2.1 Fahrersicht

Aus Perspektive des Fahrers werden im Folgenden die einzelnen Schritte des kooperativen Manövers für einen Fahrer, der manuell unterwegs ist, genauer spezifiziert. Hierbei wird ein störungsfreier Ablauf aus Sicht des abbiegenden als auch kooperierenden Fahrers betrachtet.

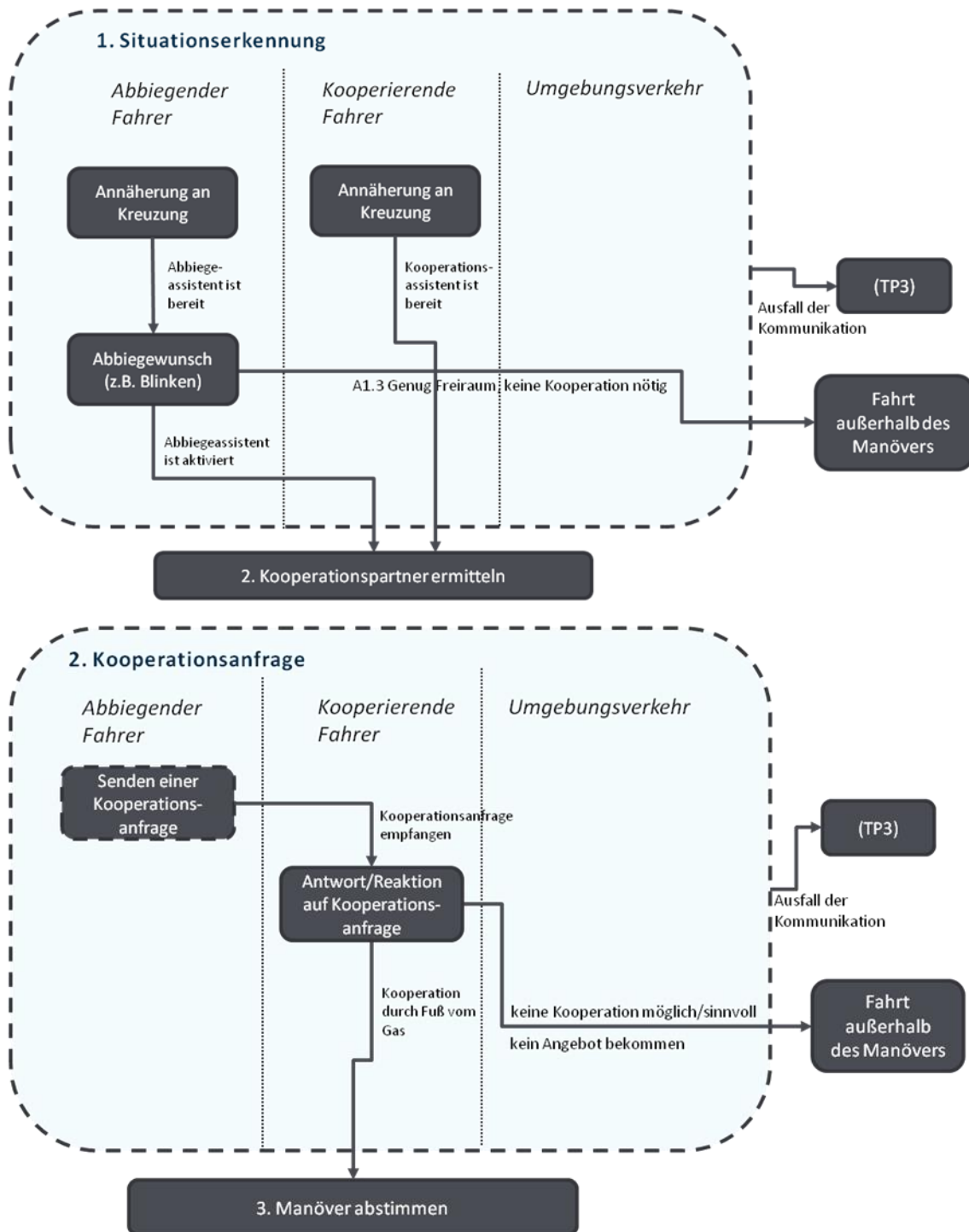
Situations-erkennung	Basic Flow - Abbiegender Fahrer	Basic Flow – Kooperierende Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	System ist im Hintergrund bereit („Abbiegeassistent bereit“). Sobald vor bzw. an einer Kreuzung der Abbiegewunsch detektiert wurde, informiert das System den Fahrer („Abbiegeassistent aktiviert“).	System ist im Hintergrund bereit („Kooperationsassistent bereit“).
Abbruch-varianten	• Ausfall der Kommunikation („Abbiegeassistent nicht verfügbar“) • Kein Abbiegewunsch erkannt • Genug Freiraum vorhanden	

Kooperations-anfrage	Basic Flow - Abbiegender Fahrer	Basic Flow – Kooperierende Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	Das Fahrzeug schickt automatisch eine Kooperationsanfrage mit Manöversion an Fzge auf der Hauptfahrbahn (evtl. wird auch Manöverborschlag empfangen). Fahrer wird weiterhin informiert, dass System aktiv ist („Abbiegeassistent aktiviert“), bis ein Kooperationspartner gefunden wurde („Kooperationspartner gefunden“).	Bei einem Abbiegenden wird der Fahrer über die Kooperationsanfrage informiert („Kooperationsanfrage empfangen“). Es wird abgefragt, ob Fahrer kooperieren will („Kooperieren durch Fuß vom Gas?“). Ergebnis wird an Abbiegenden geschickt.
Abbruch-varianten	• Ausfall der Kommunikation („Abbiegeassistent nicht verfügbar“) • Keine Kooperation möglich/sinnvoll	

Manöver- auswahl	Basic Flow - Abbiegender Fahrer	Basic Flow – Kooperierende Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	Nach erfolgter Manöverabstimmung informiert das System den Fahrer, dass eine Lücke erstellt wird („ <i>Lücke wird vorbereitet</i> “).	Nach erfolgter Manöverabstimmung wird der Fahrer gebeten, sich kooperativ zu verhalten („ <i>Aktive Kooperation – Fuß vom Gas</i> “).
Abbruch- varianten	- Ausfall der Kommunikation („Abbiegeassistent nicht verfügbar“) - Keine Einigung auf Manöver	

Durchführung	Basic Flow - Abbiegender Fahrer	Basic Flow – Kooperierende Fahrer
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	System informiert den Fahrer, dass eine Lücke erstellt ist („ <i>Lücke erstellt</i> “) und ein Einfahren möglich ist. Fahrer biegt ab. System schaltet sich aus.	Kooperationsmanöver findet weiterhin statt („ <i>Aktive Kooperation – Fuß vom Gas</i> “). System meldet erfolgreiche Kooperation („ <i>Kooperation erfolgreich. Danke!</i> “). System schaltet sich aus.
Abbruch- varianten	- Ausfall der Kommunikation („Abbiegeassistent nicht verfügbar“) - Verstoß gegen abgestimmtes Manöver durch beteiligtes Fahrzeug	

Tabelle 5.2: Basic Flow der Funktion F5 aus Fahrersicht



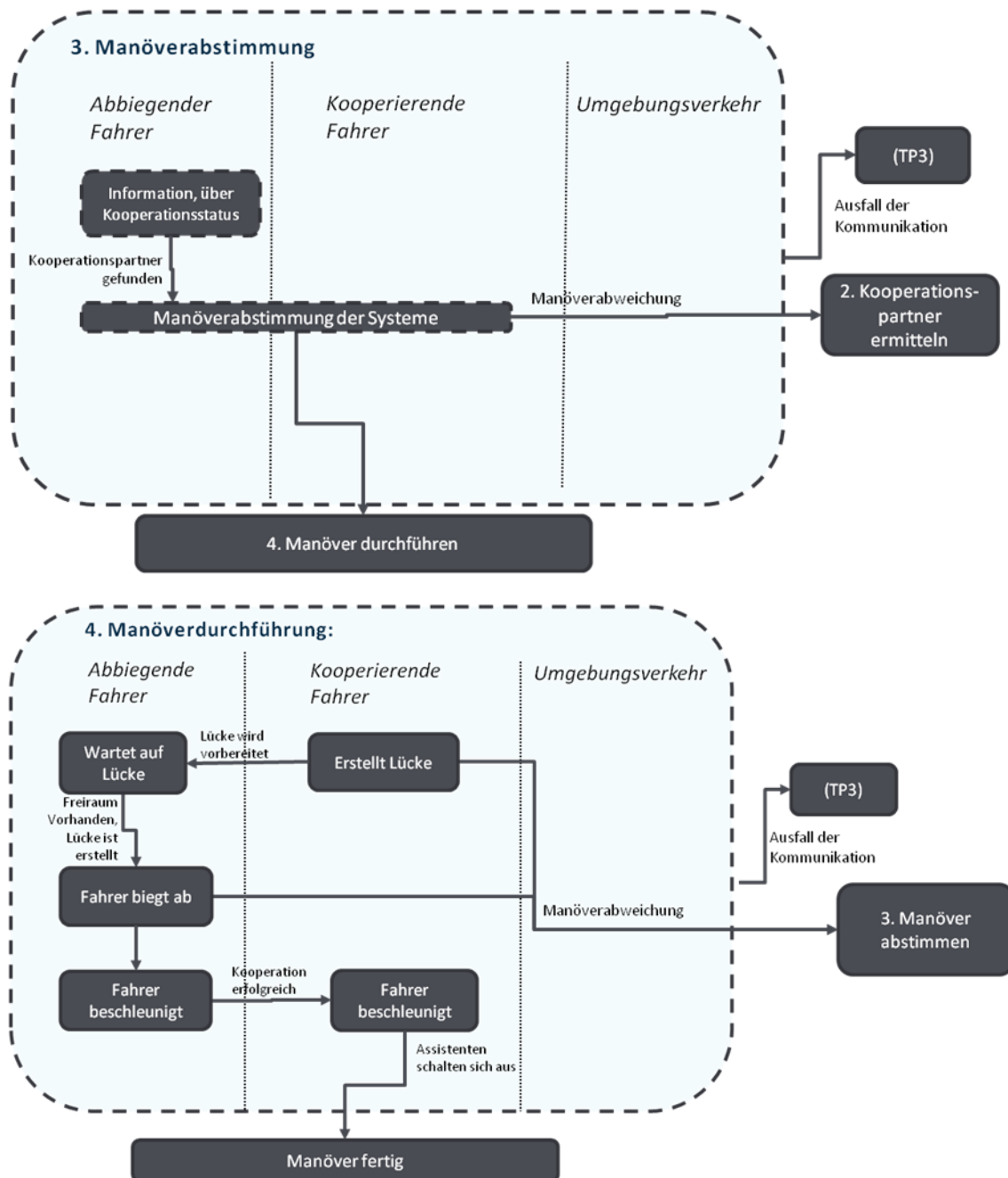


Abbildung 5.7: Interaktionsdiagramme der Funktion F5 aus Fahrersicht

5.2.2 Fahrzeugsicht

In der Fahrzeugsicht werden die einzelnen Systemabläufe beschrieben. Im Unterschied zur Fahrersicht werden jetzt mehr technische Details berücksichtigt. Die Darstellung konzentriert sich auf die interessanten Fälle der höheren Kooperationsstufen 4 und 5.

1. Situationserkennung

Zuerst muss systemisch im abbiegenden Fahrzeug der Abbiegewunsch erkannt werden. Indizien dafür sind z.B. das Setzen des Blinkers durch den Fahrer, die vorausliegende Streckengeometrie oder beispielsweise wenn sich das Fahrzeug auf einer Abbiegespur befindet. Der erkannte Abbiegewunsch wird der Umwelt mitgeteilt. Daraufhin versenden alle erreichten Teilnehmer ihre Umfeldsensordaten. Mit diesen Informationen kann insbesondere das abbiegende Fahrzeug seine Sicht der Umwelt deutlich erweitern und so auch in unübersichtlichen Manöverräumen die Situation sicherer bewerten.

Aus der initialen ersten Bewertung kann sich im einfachsten Fall ergeben, dass das Fahrzeug genug Raum für das gewünschte Manöver hat und dieses ohne weitere Kooperation, d.h. ohne gegenseitige Abstimmung und Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer durchführen kann. Falls aber erst noch Manöverraum geschaffen werden muss, dann startet mit dem nächsten Schritt die kooperative Manöverplanung.

Tabelle 5.3 beschreibt die Teilschritte detaillierter.

Teilschritt	Akteur(e)	Beschreibung
1.1 Abbiegewunsch erkennen	Abbieger	Abbieger erkennt Wunsch z.B. anhand Fahreingabe (Blinker) oder Routenführung
1.2 Abbiegewunsch mitteilen	Abbieger	Abbieger teilt dem Umfeld per Kommunikation den gewünschten Abbiegevorgang mit
1.3 Umfeldwahrnehmung mitteilen	Abbieger Umgebungsverkehr (IKS 3)	Alle Teilnehmer in der Nähe versenden ihre Sicht des Umfelds, damit der Abbieger sich ein umfassenderes Bild der Situation schaffen kann
1.4 Situation bewerten	Abbieger	Mit den erweiterten Informationen bewertet der Abbieger die Situation

Tabelle 5.3: Basic Flow in Phase 1 „Situation erkennen“ der Funktion F5

Mögliche Alternativpfade, die sich während dieser Phase auch durch Störungen ergeben können, sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst. Die Priorisierung und Abarbeitung von Alternativen wird zum späteren Zeitpunkt definiert.

Störungen	Alternativen	Folgen
S1.1 Ausfall der Kommunikation	A1.1 Ausfall der Kommunikation	Erkennung evtl. via Umfeldsensorik möglich. ggf. Definition in TP2
	A1.2 kein Abbiegewunsch erkannt	Fahrt außerhalb des Manövers
	A1.3 genug Freiraum vorhanden	Eine Kommunikation ist nicht erforderlich. Daher „Fahrt außerhalb des Manövers“.

Tabelle 5.4: Störungen und Handlungsalternativen in Phase 1 „Situation erkennen“ der Funktion F5

2. Kooperationspartner ermitteln

Im nächsten Schritt sollen die Teilnehmer ermittelt werden, die es dem abbiegenden Fahrzeug ermöglichen wollen, seinen Abbiege-/Einbiegevorgang durchzuführen.

Das abbiegende Fahrzeug schlägt im Basisszenario sein gewünschtes Manöver allen anderen erkannten und relevanten Teilnehmern vor (Austausch von Sensor-/Umfelddaten sowie Manöverdaten) und fragt dafür ihre Kooperationsbereitschaft ab.

Die Fahrzeuge bewerten jeder für sich den Vorschlag und je nachdem, ob z.B. der eigene Fahrer generell kooperativ ist oder wie akzeptabel eine mögliche Kooperation ist, teilt jedes seine Kooperationsbereitschaft mit.

Das abbiegende Fahrzeug wählt das günstigste Angebot, das nach einer zu definierenden Metrik bewertet wurde, aus und entscheidet sich somit für die Partner, die an der nun folgenden Kooperation beteiligt sein sollen. Es wird in die nächste Phase „Manöverabstimmung“ gewechselt. Tabelle 5.5 beschreibt die Teilschritte.

Teilschritt	Akteur(e)	Beschreibung
2.1 Abbiegemanöver vorschlagen, Kooperationsbereitschaft abfragen	Abbieger	Fahrzeug teilt seinen Wunsch nach einer Kooperation anhand einer ermittelten Manövervariante mit.
2.2 Vorschlag bewerten	Umgebungsverkehr IKS4+	Das Umfeld bewertet den Vorschlag hinsichtlich des eigenen Fahrprofils.
2.3 Kooperationsangebot unterbreiten	Umgebungsverkehr IKS4+	Falls eine Kooperation möglich ist, wird dem Abbiegenden dies in Form eines Angebotes unterbreitet, dass auch Kennwerte für die persönlichen Einschränkungen beinhalten kann.

Teilschritt	Akteur(e)	Beschreibung
2.4 Bestes Angebot auswählen	Abbieger	Der Abbieger entscheidet sich anhand der vorliegenden Angebote für die am besten geeigneten Kooperationspartner.

Tabelle 5.5: Basic Flow in Phase 2 „Kooperationspartner ermitteln“ der Funktion F5

Störungen	Alternativen	Folgen
	A2.1 keine Kooperation möglich/sinnvoll	5. Fahrt außerhalb des Manövers
	A2.2 kein Angebot bekommen	5. Fahrt außerhalb des Manövers <i>oder</i> 2.1 Abbiegemanöver vorschlagen: möglicherweise haben sich die Bedingungen geändert, so dass sich dann ein Partner findet
	A2.1 keine Kooperation möglich/sinnvoll	5. Fahrt außerhalb des Manövers
S2.1 Ausfall der Kommunikation	<i>ggf. Definition in TP2</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>

Tabelle 5.6: Störungen und Alternativen in Phase 2 „Kooperationspartner ermitteln“ der Funktion F5

3. Kooperatives Manöver abstimmen

Nachdem in Schritt 2 der/die passenden Kooperationspartner ausgewählt worden sind, macht das abbiegende Fahrzeug nun auf Basis der erweiterten Umfeldinformationen und den Kooperationsangeboten dem/den beteiligten Fahrzeug(en) einen konkreten Vorschlag, wie das Abbiegemanöver aussehen könnte. Jeder Kooperationspartner bewertet diesen Vorschlag und stimmt ihm entweder zu oder macht einen Gegenvorschlag. Im einfachsten Falle der Zustimmung kann das abbiegende Fahrzeug das Kommando zum Start des Manövers geben und man wechselt in die nächste Phase. Bei einem Gegenvorschlag wird dieser bewertet, zugestimmt und das Manöver gestartet oder ein erneuter Vorschlag unterbreitet. Diese Iteration wird unter Berücksichtigung von Kritikalität oder maximaler vereinbarter Iterationsschleifen durchgeführt.

Wenn kein konsolidiertes Manöver gefunden werden kann, schlägt die Kooperation fehl und muss entweder komplett abgebrochen werden oder mit Schritt 2 neu initiiert werden.

Schritt 2 und Schritt 3, die beiden Teile der Phase „Manöverplanung“, ähneln sich, da in beiden Fällen ein Manöver vorgeschlagen wird und dieses von den anderen bewertet wird. Der wesentliche Unterschied ist, dass in Schritt 2 unverbindlich abgefragt wird, während in

Schritt 3 Kooperationspartner definiert sind und jeder Partner einem Vorschlag zustimmen muss.

Tabelle 5.7 beschreibt die Teilschritte detaillierter.

Teilschritt	Akteur(e)	Beschreibung
3.1 Abbiegemanöver vorschlagen, Zustimmung einholen	Abbieger	Der Vorschlag enthält eine konkrete Darstellung, wie die Kooperation aussehen könnte.
3.2 Vorschlag bewerten	Kooperationspartner IKS4+	Die Partner im Umfeld bewerten den Vorschlag hinsichtlich der Auswirkungen auf das eigene Fahrprofil.
3.3 Gegenvorschlag	Kooperationspartner IKS4+	Falls ein Partner mit dem Vorschlag in der Form nicht einverstanden ist, kann er ihn abwandeln.
3.4 Zustimmung erteilen	Kooperationspartner IKS4+	
3.5 Vorschlag bewerten	Abbieger	Mögliche Gegenvorschläge werden durch den Abbieger bewertet und entweder per Zustimmung angenommen oder mit einem alternativen Vorschlag beantwortet.
3.6 Manöver starten	Abbieger	Wenn alle Partner zugestimmt haben, kann das abgestimmte Manöver gestartet werden.
3.7 Zustimmung verweigern	Abbieger Kooperationspartner IKS4+ (Umgebungsverkehr IKS4+)	Wenn ein Vorschlag nicht annehmbar ist und auch kein Gegenvorschlag gestellt werden kann, kann hier der Abstimmungsprozess komplett abgebrochen werden. Es muss dann mit Phase 2 neu begonnen werden. Es wäre denkbar, dass auch der Umgebungsverkehr ein Vetorecht bekommt.

Tabelle 5.7: Basic Flow in Schritt 3 „Manöverabstimmung“ der Funktion F5

Störungen	Alternativen	Folgen
	A3.1 Vorschlag ist so nicht akzeptabel	3.3 Gegenvorschlag oder A3.3 kein Gegenvorschlag möglich
	A3.2 kein Gegenvorschlag möglich	3.7 Zustimmung verweigert Dies führt dazu, dass das Manöver abgebrochen wird (5) oder mit Phase 2 neu initiiert werden muss
	A3.3 Gegenvorschlag nicht ok	3.1 es wird ein neuer Vorschlag erstellt
S3.1 Ausfall der Kommunikation	ggf. Definition in TP2	ggf. Definition in TP2

Tabelle 5.8: Störungen und Alternativen in Schritt 3 „Manöverabstimmung“ der Funktion F5

4. Manöver durchführen und abschließen

Sowohl das abbiegende Fahrzeug als auch die kooperierenden Fahrzeuge versuchen gemäß des abgestimmten Plans aus der Phase „Manöver planen“ ihre geplanten Trajektorien umzusetzen, d.h. das abbiegende Fahrzeug wird plangemäß beschleunigen und die kooperierenden Fahrzeuge sollten plangemäß verzögern, um die gewünschte Lücke zu schaffen.

Während des ganzen Manövers teilen alle Fahrzeuge sich weiterhin kontinuierlich ihre Umfelddaten mit, so dass die Kooperationsteilnehmer jederzeit den Manöverstand überwachen können. Falls ein Kooperationsteilnehmer eine zu große Abweichung vom Soll-Manöver feststellt, kann erneut im Hintergrund Schritt 3 durchlaufen werden, um ein konsolidiertes, angepasstes Manöver abzustimmen. Falls sich kein angepasstes Manöver finden lässt, bedeutet dies einen Abbruch der Kooperation.

Sobald das abbiegende Fahrzeug die passende Geschwindigkeit und Position hat und den geschaffenen Freiraum festgestellt hat, wird es in diesen einfahren und auf die gewünschte Endgeschwindigkeit beschleunigen. Damit ist aus seiner Sicht das Manöver erfolgreich abgeschlossen.

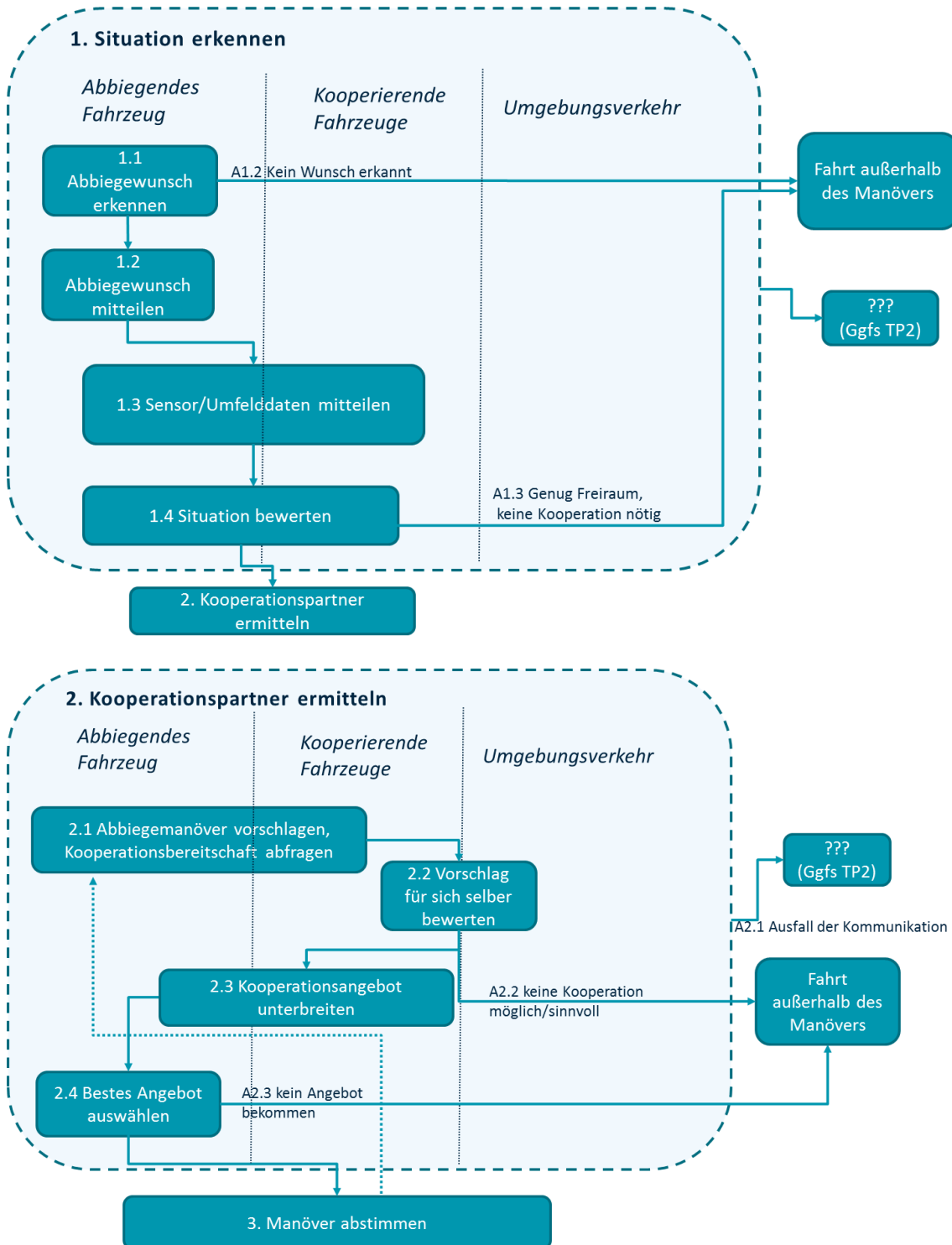
Tabelle 5.9 beschreibt die einzelnen Teilschritte detaillierter. Tabelle 5.10 beschreibt alternative Pfade, die sich durch Störungen ergeben können.

Teilschritt	Akteur(e)	Beschreibung
4.1 Umfelddaten mitteilen	Abbieger Kooperations-partner IKS4+ Umgebungsverkehr IKS3+	
4.2 Verzögern, Umfeld beobachten	Kooperations-partner IKS4+	Der abgestimmte Plan wird umgesetzt und überwacht.
4.3 Beschleunigen, Umfeld beobachten	Abbieger	Der abgestimmte Plan wird umgesetzt und überwacht.
4.4 In Freiraum einfahren	Abbieger	
4.5 Situative Beschleunigung	Abbieger Kooperations-partner IKS4+	Hiermit ist die Kooperation erfolgreich beendet.

Tabelle 5.9: Basic Flow in Schritt 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F5

Störungen	Alternativen	Folgen
	A4.1 Fahrzeuge verletzen den Plan	3. Manöver abstimmen Wenn z.B. Fahrzeuge stärker ihre Geschwindigkeit ändern als vorhergesehen oder neue Verkehrsteilnehmer auftauchen, sodass der aktuelle Plan nicht mehr durchgeführt werden kann, muss ein neues Manöver abgestimmt werden. Während des Vorgangs gilt erst einmal der alte Plan – soweit möglich weiter.
S4.1 Ausfall der Kommunikation	<i>ggf. Definition in TP2</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>

Tabelle 5.10: Störungen und Alternativen in Schritt 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F5



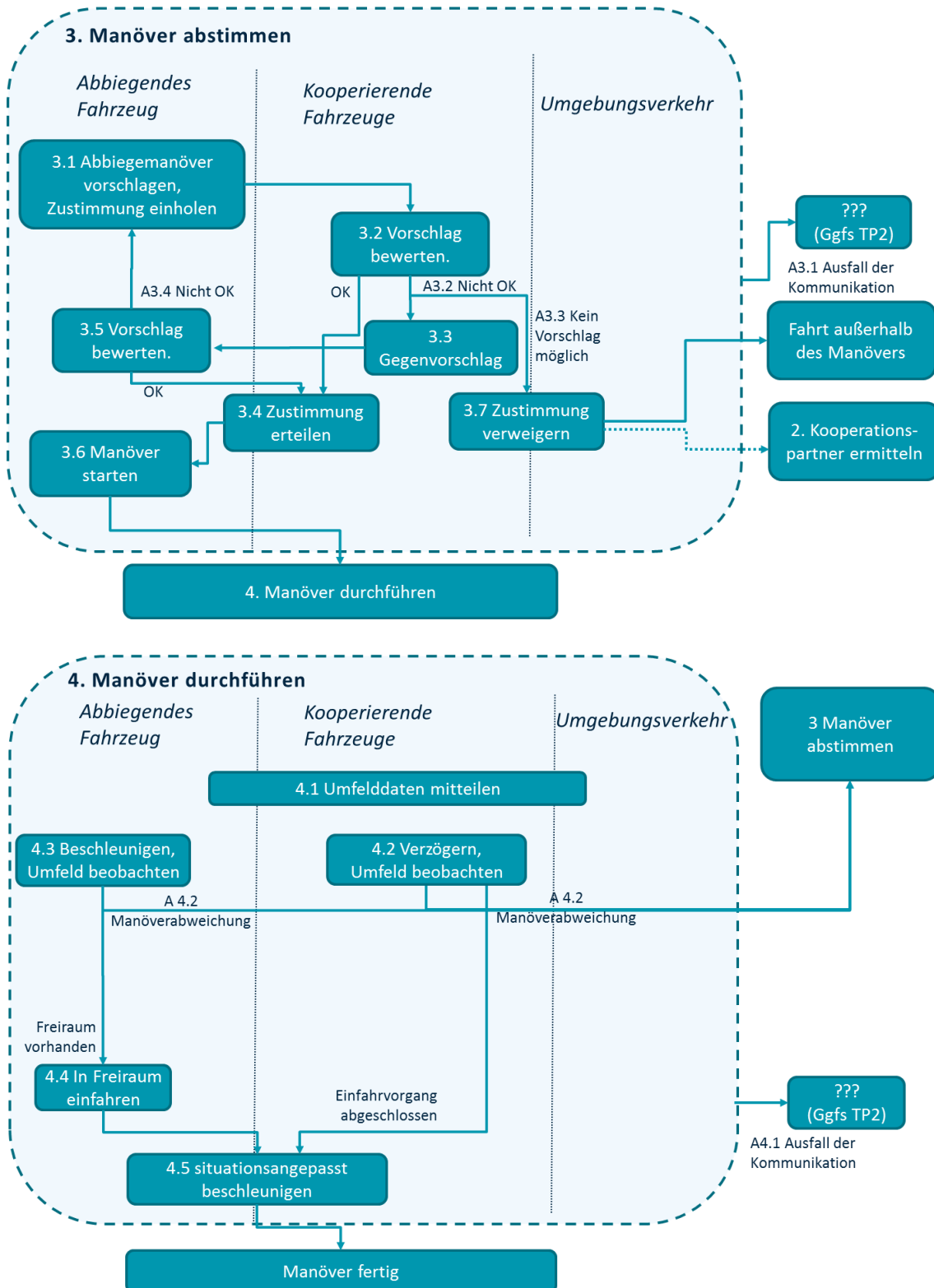


Abbildung 5.8: Interaktionsdiagramme der Funktion F5 aus Fahrzeugsicht

5.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der Literaturanalyse sowie der sich daraus ergebenden Implikationen für das MMI gegeben.

5.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands

Linksabbiegen an Kreuzungen ist eine anspruchsvolle Fahraufgabe, die die Aufmerksamkeit des Fahrers erfordert. Der Fahrer muss meist unter Zeitdruck (Brouwer & Ponds, 1994) seine Aufmerksamkeit auf verschiedene Bereiche und Informationen aufteilen, Signale und Verkehrsschilder wahrnehmen und verarbeiten sowie seine Handlungsweise festlegen und ausführen (Braitman et al., 2007). An T-Kreuzungen können zwei Linksabbiegevarianten unterschieden werden: (1) Abbiegen auf eine Hauptfahrbahn und (2) Abbiegen von einer Hauptfahrbahn. Die Variante Abbiegen auf eine Hauptfahrbahn stellt dabei die höheren Anforderungen an den Fahrer, insbesondere an verkehrsschildgeregelten Kreuzungen (Kittleson & Vandehey, 1991).

Die Hauptaufgabe eines Fahrers ist, eine geeignete Lücke zum Abbiegen zu finden. Beim Abbiegen auf eine Hauptfahrbahn ist dies eine Lücke im querenden Verkehr und beim Abbiegen von einer Hauptfahrbahn eine Lücke im Gegenverkehr. Dazu muss der Fahrer nach Dabbour (2015) (1) die Distanz zum nächsten Fahrzeug, (2) seine Geschwindigkeit und Beschleunigung, sowie (3) die Zeit und/oder Distanz, die er selbst zum Beschleunigen auf diese Geschwindigkeit benötigt, schätzen. Eine detaillierte Aufgabenbeschreibung ist im Aufgabenmodell nach Chovan et al. (1994) zu finden. Die Motive eines Fahrers, eine Lücke zu akzeptieren (Lord-Attivor & Jha, 2012), sind (1) die Wartezeit zu reduzieren und (2) so sicher wie möglich abzubiegen.

In der Literatur wird die Lücke („gap“) als das Zeitintervall zwischen der Ankunft zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge sowie die Differenz („lag“) als die Zeit zwischen der Ankunft des Ego-fahrzeugs und dem nächsten relevanten Fahrzeug an der Kreuzung definiert (Brilon, König & Troutbeck, 1999). Um die Größe einer Lücke zu bestimmen, die vom Fahrer als angemessen bewertet wird, sind in der Literatur verschiedene Modelle zu finden. Raff und Hart (1950) definieren dazu eine kritische Lücke, bei der die Anzahl akzeptierter Lücken, die kleiner als eine bestimmte Lücke sind, der Anzahl der verworfenen Lücken, die größer als diese Lücke sind, entspricht.

Der wichtigste zeitliche Parameter ist die Größe einer Lücke, die ein Fahrer für einen Abbiegevorgang akzeptiert. Diese beträgt beim Linksabbiegen auf eine Hauptfahrbahn 5 bis 8 s. Einen Einfluss auf die akzeptierte Lückengröße hat (1) die Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn (z.B. Swedish Capacity Manual, 1977; Yan et al., 2007). Mit zunehmender Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn nimmt auch die Größe der akzeptierten Lücke zu. (2) Erfolgt die Verkehrssteuerung durch ein Stoppschild werden im Vergleich zu einer mit einem Vorfahrtachten-Schild geregelten Kreuzung ebenfalls größere Lücken akzeptiert (Swedish Capacity Manual, 1977). Ferner akzeptieren Fahrer kleinere Lücken, wenn (3) die Verkehrsdichte

auf der Hauptstraße höher ist (Sahraei & Puan, 2014) und (4) mit zunehmender Wartezeit des Fahrzeugs auf der Nebenfahrbahn (Polus et al., 2003).

Relevante Parameter beim Abbiegen von der Hauptfahrbahn sind Kombinationen aus akzeptierten Lücken und Geschwindigkeiten, die von der Art des entgegenkommenden Fahrzeugs abhängen (Hancock et al., 1991). Relevant ist zudem die TTI (Time-to-Intersection)-Differenz des Egofahrzeugs und des entgegenkommenden Fahrzeugs. Mohebbi und Grey (2007) zeigen, dass Fahrer ihre Entscheidung abzubiegen auf Basis der TTI des entgegenkommenden Fahrzeugs und dessen Abstand treffen.

Bisherige Assistenzkonzepte versuchen den Fahrer beispielsweise durch eine kontinuierliche Visualisierung des Risikolevels beim Linksabbiegen zu unterstützen (Obojski & Meinecke, 2008; Hägglund, 2008). Andere Systeme geben visuelle und auditive Warnungen an den Fahrer aus, wenn an einer Kreuzung Kollisionsgefahr besteht oder greifen zusätzlich in die Längsführung ein (z.B. Gradenegger et al., 2006). Mit Warnsystemen wird zwar ein anderer Ansatz als mit kooperativen Systemen verfolgt, dennoch werden einige exemplarische Studien dargestellt, um einen Überblick über typische MMI-Lösungen und deren Evaluation zu erhalten.

5.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung

Folgende Empfehlungen zur MMI-Gestaltung können aus der Literaturrecherche abgeleitet werden:

- Linksabbiegen ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die der Aufmerksamkeit des Fahrers bedarf. Demzufolge sollte ein Abbiegeassistent selbsterklärend und einfach gestaltet sein, sodass die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Fahraufgabe gerichtet bleiben kann. Auf zusätzliche Anzeigeelemente im Fahrzeug sollte soweit möglich verzichtet werden.
- Aus Akzeptanzgründen sollten keine zu kleinen Lücken empfohlen bzw. automatisiert angesteuert werden. Beim manuellen Fahren akzeptieren Fahrer Lücken ab einer bestimmten Größe, die von einigen Faktoren abhängt. Ein deutlich anderes Verhalten des Assistenten könnte die Akzeptanz beeinträchtigen.
- Um die Akzeptanz zu erhöhen, sollte der Fahrer auf der Hauptfahrbahn nicht stark verzögern müssen, damit einem Fahrzeug auf der Nebenfahrbahn das Abbiegen erleichtert/ermöglicht wird.
- Aufgrund der hochgeübten Längsregelung der Fahrer, sollten Verhaltensempfehlungen entweder einfache Handlungsanweisungen sein (z.B. „Fuß vom Gas“) oder Handlungsziele angeben (z.B. indem eine Ziellücke markiert wird).
- Kooperative Systeme sollten ihr Verhalten erklären, um dieses für den Fahrer nachvollziehbar zu machen und die Akzeptanz zu erhöhen.

5.4 Weitere funktionsspezifische Untersuchungsgegenstände

Im Rahmen der Use Case-Analyse wurden durch die Projektpartner eine Reihe von Fragestellungen identifiziert, die über die Perspektive, die TP1 einnimmt, hinausgehen, die aber für die weitere inhaltliche Ausplanung der folgenden Teilprojekte TP2, TP3, TP4 bzw. TP5 relevant sein könnten:

- Wie kann eine Bewertungsmetrik/Kostenfunktion konkret aussehen?
- Wie kann insbesondere die Gefahr einer Staubildung/Schockwellen prognostiziert und bewertet werden?
- Wie groß ist die zulässige Abweichung zwischen Soll- und Isttrajektorien?
- Wie ist mit einem Abbruch der Kooperation bei zu großer Abweichung umzugehen, insb. in Bezug auf die zu gewährleistende Sicherheit?
- Verifikation, Auslegung und Festlegung von Wertebereichen der in Abschnitt 5.1.3 definierten Parameter

6 FUNKTION 6: KOOPERATIVES ÜBERHOLEN DURCH LKW AUF AUTOBAHNEN

Die Kooperation bei einem Überholmanöver durch Lkw auf der Autobahn hat zwei Schwerpunkte. Einerseits kann das kooperative Überholmanöver zwischen zwei Lkw bzgl. Zeit, Ort und Fahrstrategie abgestimmt werden. Andererseits müssen dabei insbesondere bei hoher Verkehrsdichte auch die nachfolgenden Fahrzeuge bzw. die Fahrzeuge auf der Nachbarspur mit einbezogen werden. Eine aktive Kooperation dieser Fahrzeuge kann ein Lkw-Überholmanöver effizienter und auch sicherer für den nachfolgenden Verkehr machen. Im Folgenden soll beschrieben werden, welche Anforderungen ein regelkonformes LKW-Überholmanöver an den Fahrer stellt und welche potenziellen Vorteile eine kooperative Assistenzfunktion bei einem LKW-Überholvorgang auf Autobahnen den beteiligten Akteuren in Abhängigkeit der gegebenen Randbedingungen bietet.

Kooperation Lkw-Lkw

Die Wahl des richtigen Zeitpunkts für das Überholen eines langsam fahrenden Fahrzeugs stellt für den Fahrer des überholenden Fahrzeugs eine anspruchsvolle Aufgabe dar, da die Zielsetzung einerseits in Regelkonformität, also möglichst geringem Zeitbedarf, und andererseits in größtmöglicher Effizienz, insbesondere in der Vermeidung eines Abbremsens vor Beginn des Überholvorgangs mit anschließend erneutem Geschwindigkeitsaufbau besteht.

Hierbei ist neben dem häufig mit hoher Differenzgeschwindigkeit überholenden umgebenden Verkehr auch die Topographie der Strecke zu berücksichtigen.

Grundvoraussetzung für die Entscheidungsfindung und Planung des Überholvorgangs ist die Beobachtung des zu überholenden Fahrzeugs während der Annäherung und eine Abschätzung seiner Fahrstrategie, d.h. ob das Fahrzeug potenziell beschleunigen, bremsen oder mit gleichbleibender Geschwindigkeit weiterfahren wird. Mit der in den letzten Jahren zunehmenden Verbreitung sogenannter vorausschauender GPS-Tempomaten, wie z.B. dem EfficientCruise-System von MAN, ist diese Aufgabe im Vergleich zur Verwendung fest programmierter Tempomaten deutlich komplexer und weniger präzise lösbar geworden, da die Geschwindigkeiten im nicht gebundenen Verkehr in Abhängigkeit der Steigung vorausliegender Streckenabschnitte variieren kann (siehe Abbildung 6.1). Daraus folgt, dass die Genauigkeit der Prognose der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht mehr ausreicht, um ausschließen zu können, dass der Überholvorgang die zulässige Dauer überschreitet oder gar abgebrochen werden muss.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt für die Entscheidungsfindung liegt in den häufig zwischen verschiedenen Lkw bestehenden Unterschieden in dem von außen nur schwer abschätzbaren Verhältnis zwischen Motorleistung und Zuggesamtmasse, welches im Folgenden als Leistungsgewicht bezeichnet werden soll. Insbesondere in langen Steigungsstrecken, in denen langsam fahrende Lkw mit einer hohen Relativgeschwindigkeit überholt werden, ist die Wahl des Überholpunktes nur in einer sehr eingeschränkten Variabilität möglich. Die hohe Geschwindigkeit, die

ein Lkw aus der Ebene heraus mit in die Steigung nehmen kann, kann auch schon bei mittlerem Leistungsgewicht in der Steigung aufrechterhalten werden.

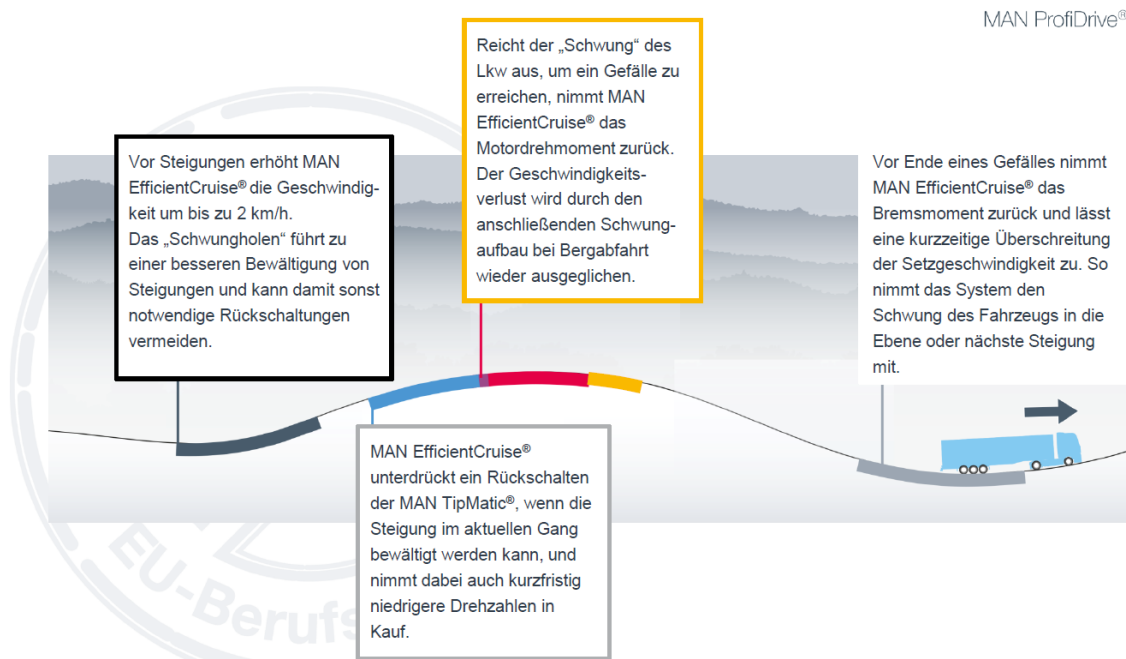


Abbildung 6.1: Funktionsweise des steigungsabhängigen GPS-Tempomaten¹²

Bei Annäherung an ein vorausfahrendes, langsames Fahrzeug wie beispielsweise einen Lkw oder einen Pkw mit Anhänger, muss die Entscheidung zum Überholen insb. bei dichtem Verkehr häufig innerhalb von 6-10 s getroffen und das Überholmanöver dann auch begonnen werden. Ein Nicht-Überholen führt zum Verlust der zuvor aufgebauten kinetischen Energie. Ein erneutes Ansetzen zum Überholen ist dann aus Fahrersicht häufig nur bei einem großen Unterschied des Leistungsgewichts zu realisieren, um viel Zeit einzusparen. Dies wird allerdings durch einen hohen Kraftstoffverbrauch erkauft, der aufgrund der nötigen Überwindung des zusätzlichen Steigungswiderstands beim Geschwindigkeitsaufbau entsteht.

Insgesamt kann die Entscheidungsfindung bei der Planung eines Überholvorgangs folglich bereits erheblich verbessert werden, wenn ein geringes Maß der Kooperation in Form eines simplen Austauschs der aktuellen und in naher Zukunft geplanten Sollgeschwindigkeit sowie des jeweiligen Leistungsgewichts über V2X-Kommunikation erfolgt. Weitere Verbesserungen können erzielt werden, wenn Informationen über Position und Geschwindigkeit des umgebenden Verkehrs mit einbezogen werden können. Der Grad des Szenenverständnisses wird unter Berücksichtigung einer zu erwartenden unvollständigen Ausstattungsrate noch erhöht, wenn Fahrzeuge ihre „Sicht der Situation“ in Form von Umgebungssensordaten kommunizieren.

¹² bei MAN EfficientCruise® genannt

Szenario	Regelkonformität des Überholmanövers	Energie-effizienz	Wahl des Überholorts und Zeitpunkts	Kooperations-schwerpunkt
Ebene	mittel	niedrig	niedrig	Lkw-Lkw
Steigung	niedrig	mittel	mittel	Lkw-Lkw
Ebene und dichter Verkehr	hoch	mittel	mittel	Lkw-Lkw-nachfolgender Verkehr
Steigung und dichter Verkehr	mittel	hoch	hoch	Lkw-Lkw nachfolgender Verkehr

Tabelle 6.1: Anforderungen und Risiko aus Fahrersicht an das Lkw-Überholmanöver bei verschiedenen Randbedingungen unter Annahme eines unterschiedlichen Leistungsgewichts

Kooperation des Umgebungsverkehrs

Gerade in Überholsituationen an langen Steigungsstrecken ist eine Kooperation nicht nur zwischen den beiden direkt am Überholmanöver beteiligten Fahrzeugen notwendig, sondern auch in hohem Maße mit dem nachfolgenden Verkehr. Bei dichtem Verkehr erhöht sich diese Notwendigkeit zusätzlich. Durch eine ausreichend frühzeitige Trajektorienplanung kann ein Überholmanöver durch Lkw zielgerichteter und im Einklang mit dem Umgebungsverkehr durchgeführt werden, indem die nachfolgenden Fahrzeuge über das Überholmanöver informiert und aktiv mit in die Manöverplanung und -durchführung einbezogen werden. Eine aktive Kooperation durch Spurwechsel oder frühzeitiges Verzögern kann auch dem nachfolgenden Verkehr helfen, die Sicherheit und Effizienz zu erhöhen. In besonderem Maße kann eine Verringerung der Dauer des Überholvorgangs erzielt werden, wenn Überholer und zu Überholender mit einem CACC-System mit Platooning-Funktionalität ausgestattet sind, welches das Fahren in vergleichsweise geringerem Abstand erlaubt. Das volle Potenzial einer Kooperation beim Überholen wird erreicht, wenn alle beteiligten Fahrzeuge sich über einen angeforderten Überholvorgang abstimmen und sich aktiv an dessen Umsetzung beteiligen.

Initiierung des Überholmanövers

Für die Initiierung eines kooperativen Überholmanövers sind grundsätzlich zwei Möglichkeiten denkbar:

- Ein Fahrzeug mit einer höheren mittleren Geschwindigkeit holt ein Fahrzeug mit einer niedrigeren mittleren Geschwindigkeit ein und möchte überholen -> Initiierung durch das nachfolgende Fahrzeug
- Ein vorausfahrendes Fahrzeug wünscht ein Überholen des nachfolgenden Fahrzeugs. Die Gründe dafür können unterschiedlich sein.

- Ein vorausfahrendes Fahrzeug will konsequent seine eigene Fahrstrategie fahren, kann dies aber aus Gründen des nachfolgenden Verkehrs nicht tun, da der Fahrer das Gefühl hat, den nachfolgenden Lkw-Verkehr zu behindern.
- Das vorausfahrende Fahrzeug möchte situativ abhängig das volle Potenzial einer energieeffizienten Fahrweise ausschöpfen und beabsichtigt Geschwindigkeitsreduzierungen, die für den nachfolgenden Verkehr mit anderer Fahrstrategie nicht sinnvoll und auch nicht ohne weiteres ausreichend früh ersichtlich sind.
- Wiederherstellen einer definierten Fahrzeugreihenfolge insbesondere nach Auffahrten, Verflechtungsbereichen und Fahrstreifensubtraktion.

Ein weiterer erschwerender Aspekt aus Fahrersicht für die Planung eines Überholvorgangs sind vorausliegende Verkehrsereignisse oder auch aufkommende Streckenverbote, seien sie statisch oder dynamisch durch Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Ein vermeintlicher langfristiger Vorteil unter der Annahme einer freien Fahrt voraus, der die kurzfristige Investition von Kraftstoff rechtfertigt, kann durch ein kurzfristig aufkommendes Streckenverbot oder auch sonstige Verkehrsergebnisse wie einen Stau nahezu egalisiert werden.

- Überholvorgang: STVO §5 „Überholen darf nur, wer mit wesentlich höherer Geschwindigkeit als der zu Überholende fährt.“, „Wer zum Überholen ausscheren will muss sich so verhalten, dass eine Gefährdung des nachfolgenden Verkehrs ausgeschlossen ist.“, „Wer überholt, muss sich so bald wie möglich wieder nach rechts einordnen.“, „Wer überholt, darf dabei denjenigen, der überholt wird, nicht behindern“.
- Konkrete Rechtsprechung OLG Hamm (AZ: 4 Ss OWi 629/08): Differenzgeschwindigkeit sollte $\geq 10 \text{ km/h}$ betragen, Dauer des Überholvorgangs $\leq 45 \text{ s}$

6.1 Beschreibung

6.1.1 Use Cases und Szenarien

Abbildung 6.2 zeigt schematisch den Ansatz für die Funktion Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen. Für ein Überholen des schwarzen Lkw kann eine Abstimmung zwischen den beiden Lkw, dem umgebenden Verkehr sowie auch unter der Berücksichtigung von Hinweisen und Empfehlungen der Verkehrsinfrastruktur erfolgen. Beispielhaft dargestellt ist eine Autobahn mit zwei Fahrstreifen. Bei einer Autobahn mit drei Fahrstreifen dürfte das Kooperationspotenzial insbesondere zwischen den Lkw und dem nachfolgenden Verkehr noch größer sein.

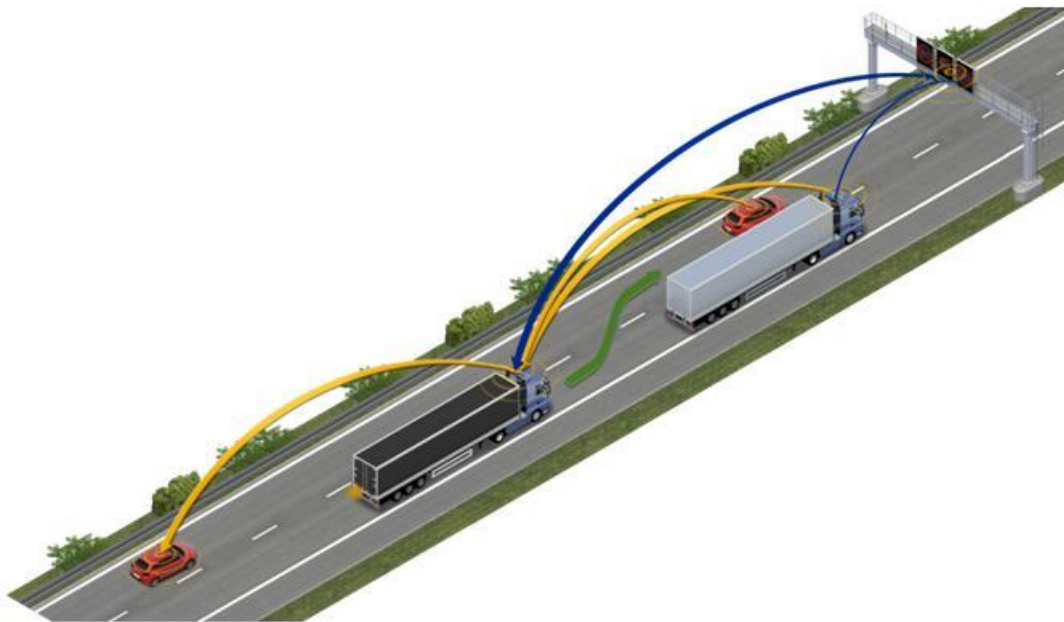


Abbildung 6.2: Überholen durch Lkw auf der Autobahn

(Grafik erstellt mit C2C-CC Illustration Toolkit © Car2Car Communication Consortium)

Der Funktionsbaum in Abbildung 6.3 zeigt die zugehörigen Use Cases und die Szenarien. Die Funktion ist nicht an spezielle örtliche Begebenheit oder bauliche Einrichtungen gebunden, sondern kann grundsätzlich überall eingesetzt werden, wo ein Einsatz bzw. ein Überholvorgang nicht explizit verboten ist. Aus dem gegebenen Nutzenfall lassen sich abhängig vom Verkehrsaufkommen mehrere Szenarien ableiten. Es wird nachfolgend nur das vergleichsweise anspruchsvollste Szenario „Dichter Verkehr“ betrachtet, aus dem sich die übrigen Szenarien „geringer“ oder „kein Verkehr“ durch Vereinfachung ableiten lassen.

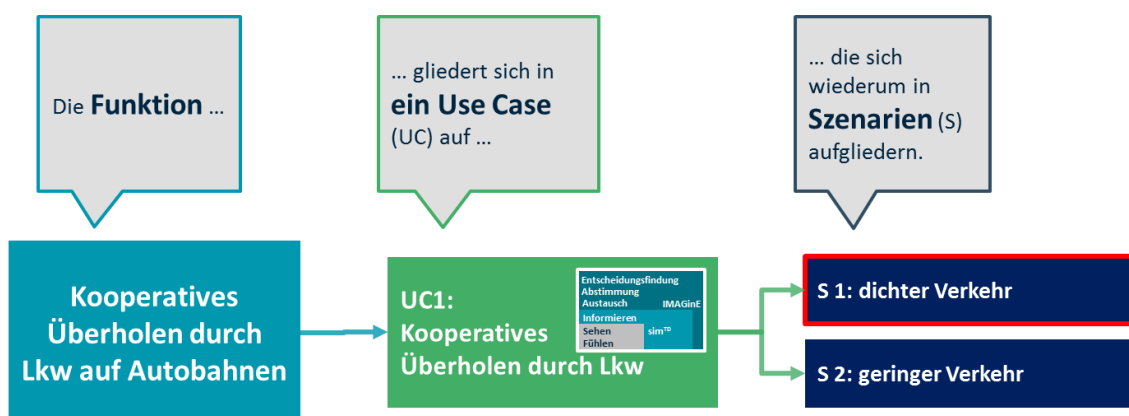


Abbildung 6.3: Funktionsbaum für Funktion F6 „Kooperatives Überholen durch Lkw auf der Autobahn“

Der gegebene Nutzenfall und das Szenario hängen unter anderem von nachfolgenden Randbedingungen bzw. Einflussgrößen ab:

- Umwelt:
 - Anzahl Fahrstreifen
 - Steigung
 - Streckenverbote
 - Verkehrsereignisse
- Fahrzeug
 - Leistungsgewicht
 - Fahrstrategie (Fahrer oder GPS-Tempomat)
- Fahrer
 - Kooperationsbereitschaft
 - Persönliches Fahrprofil

Von entscheidender Bedeutung für die Fragestellung, in welchem Maße sich bei einem kooperativen Lkw-Überholmanöver Verbesserungen in Bezug auf die Dauer des Überholvorgangs, den Kraftstoffverbrauch der beteiligten Fahrzeuge und die Auswirkungen auf den umgebenden Verkehr erzielen lassen, ist der stark von der Ausbaustufe der Kommunikation zwischen den Fahrzeugen abhängige Grad der Kooperation, welcher durch die IMAGinE Kooperationsstufen (IKS) beschrieben werden kann.

Bei Systemen mit IKS 1 stehen dem Fahrer des überholenden Fahrzeugs nur die konventionellen Mittel zur Kommunikation mit dem zu überholenden Fahrzeug zur Verfügung, wie z.B. Blinker oder Lichthupe. Zur Beurteilung der relativen Geschwindigkeit und Positionierung stehen ihm in eingeschränkter Form nur die Sensorik eines Abstandsregeltempomaten oder Spurwechselassistenten zur Verfügung. Der geeignete Zeitpunkt zum Wiedereinscheren kann ggf. durch das überholte Fahrzeug via Lichthupe signalisiert werden.

Systeme mit einer Ausbaustufe von IKS 2 verfügen über konventionelle V2X-Technologie, so dass über eine WLAN- oder Mobilfunkverbindung Bewegungs- und Positionsdaten von ausgestatteten Fahrzeugen zur Verfügung stehen können. Stehen dem Fahrer oder einer Automatisierungsfunktion diese Informationen zur Verfügung, so können kritische Schritte des Überholvorgangs, wie z.B. das Wiedereinscheren vereinfacht werden.

Im Fall IKS 3 werden über die Kommunikationsschnittstelle auch Daten der Onboard-Sensorik ausgetauscht. Dies erlaubt dem Überholer einen „Blick über das vorausfahrende Fahrzeug“ und somit eine vorausschauendere Entscheidung, ob ein Überholvorgang im Hinblick auf das Verhalten des vorausfahrenden und des rückwärtigen Verkehrs und ggf. bevorstehende Tempolimits sinnvoll ist.

In allen vorher genannten Kooperationsstufen stellt der Fahrer des überholenden Fahrzeugs erst nach Einleitung seines Überholmanövers fest, ob das überholte Fahrzeug sich kooperativ verhalten wird. Erst mit IKS 4 erfolgt zusätzlich zur Verbesserung des Szenenverständnisses auch eine Abstimmung zwischen den Fahrzeugen (Überholer, zu Überholender und ggf. umliegender Verkehr) im Sinne eines Austausches und einer Abstimmung von Plantrajektorien mit dem umgebenden Verkehr vor Einleitung des Überholvorgangs. Somit wird es möglich, dass der umliegende Verkehr nicht beeinträchtigt wird.

Die höchste Ausbaustufe der Kooperation IKS 5 schöpft schließlich das volle Potenzial des kooperativen Überholens aus, da zusätzlich zu einer möglichst verbindlichen Zusicherung des Überholten (in Form einer Trajektorie), für die Dauer des Überholvorgangs nicht zu beschleunigen oder gar zu verzögern, eine dezentrale Manöverabstimmung unter Berücksichtigung der Sensorik beider Fahrzeuge und ggf. der Verwendung einer digitalen Karte mit dem Ziel einer hinsichtlich Effizienz und Geschwindigkeit für alle Akteure möglichst optimalen Lösung stattfindet.

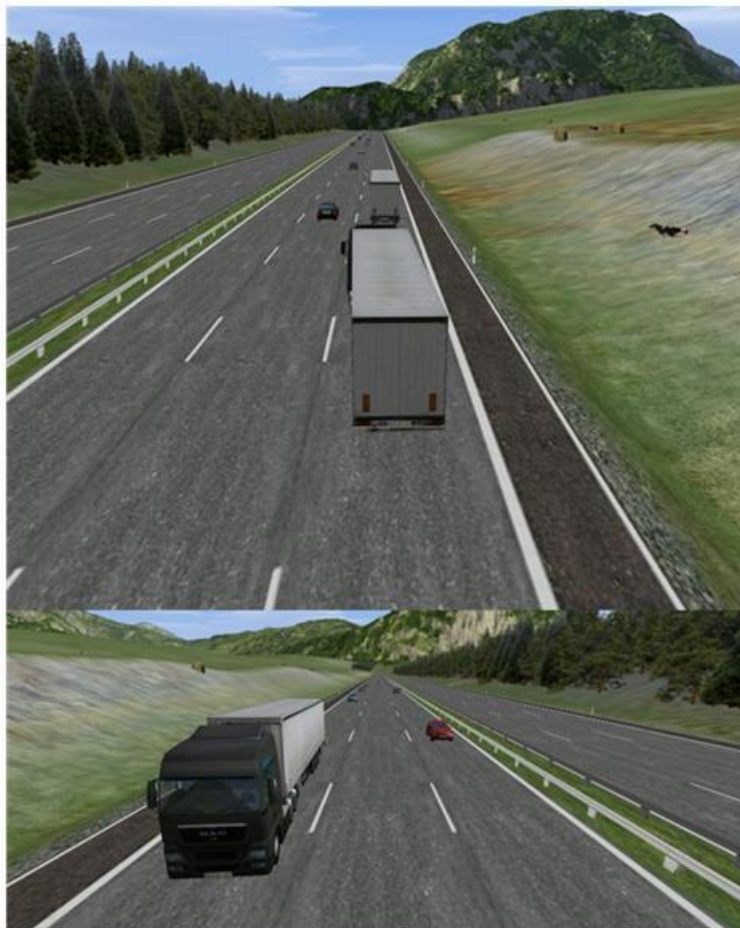


Abbildung 6.4: Ausschnitt aus Visualisierung zur Funktion F6

Zur Unterstützung des gemeinsamen Verständnisses des kooperativen Überholens wurden Visualisierungen erzeugt. Abbildung 6.4 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt aus einem dieser Videoclips. Im oberen Bildteil ist zu sehen, dass der nachfolgende Lkw in einer Steigung zum Überholen ansetzt. Die Relativgeschwindigkeit ist hoch und der rote Pkw, zu sehen im unteren Bildteil, ist von der mittleren auf den linken Fahrstreifen gewechselt, um so das Überholmanöver des Lkw aktiv zu unterstützen.

6.1.2 Priorisierung von Use Cases

Da die Formulierung der Funktion F6 im Vergleich zu anderen IMAGinE-Funktionen bereits vergleichsweise spezifisch auf einen Nutzenfall zugeschnitten ist und deren zugeordnete Szenarien sich allein in der Komplexität der Randbedingungen (Verkehr, Topographie) unterscheiden, soll im weiteren Verlauf des Projekts IMAGinE in F6 exemplarisch ein besonders anspruchsvolles Szenario mit hohem Verkehrsaufkommen betrachtet werden.

Weitere denkbare Use Cases lassen sich durch Vereinfachung aus diesem Szenario ableiten, so dass von einer Eignung des im Rahmen des Projekts IMAGinE für den gewählten Use Case gefundenen technische Lösungen auch für die jeweils vereinfachten Fälle ausgegangen wird. Die in der Projektlaufzeit durchgeführten Entwicklungen und Untersuchungen sollen zunächst in Software-in-the-Loop-Versuchen in einer Simulationsumgebung, als auch zu einem späteren Zeitpunkt in Realfahrzeugen erfolgen.

6.1.3 Detaillierung des räumlichen und zeitlichen Ablaufs der Funktionsausprägung

Tabelle 6.2 stellt zum besseren Verständnis anhand beispielhafter Zahlen dar, wie der räumliche und zeitliche Ablauf des Manövers aussehen könnte.

Ausprägung	Beschreibung
Use Case-Beteiligte	Überholender, zu Überholender, Verkehrsinfrastruktur sowie umgebender Verkehr, alle im Idealfall mit V2X ausgestattet.
Randbedingungen	Während IMAGinE kann auch untersucht werden, inwieweit die Funktion realisiert werden kann, wenn Umgebungsverkehr nicht oder nur unvollständig mit V2X ausgestattet ist (Erkennung des Umgebungsverkehrs durch bordeigene Sensorik). Kommunizierende Fahrzeuge können in den Entscheidungsprozess eingebunden werden oder werden nach aktuell gültigen ACC-Verzögerungsgrenzen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Abstandes berücksichtigt (passive Kooperation des Umgebungsverkehrs). Sollte eine ausreichend große Lücke¹³ nicht verfügbar sein, wird ein Manöver unter Zuhilfenahme einer aktiven Kooperation durchgeführt.
Mögliche Störungen	Kommunikationsabbriss, Fahrer übersteuert, Lkw-Überholverbot, verkehrliche Störung
Automatisierungsgrad	Stufe 1 Assistiert (nur Längsführung)
Zeitlicher und räumlicher Ablauf	Manöver anfragen und abstimmen: Angenommene maximale Differenzgeschwindigkeit bis zu 40 km/h (am Berg) Annahme: Funkreichweite ITS-G5 bis zu 400 m, Sicherheitsabstand 50 m Abstimmung, Entscheidung und Einleitung des Überholmanövers muss innerhalb von 32 s erfolgen. Manöver durchführen: Angenommene minimale Differenzgeschwindigkeit 10 km/h, bei angenommenem 137 m zu überbrückendem Weg ergibt sich eine Überholdauer ca. 50 Sekunden, bei 40 km/h Differenzgeschwindigkeit sind es ca. 13 Sekunden.

Tabelle 6.2: Detaillierung der Funktion F6

Der Idealablauf eines kooperativen Manövers geht von einer störungsfreien Durchführung aus. Unter realen Betriebsbedingungen können jedoch vielfältige Arten von Störungen einwirken. So kann beispielsweise ein Kommunikationsabbriss den Austausch sensorischer Informationen und den Abstimmungsprozess bzw. die Einhaltung des Manöverplans unterbrechen. Fahrer beteiligter Fahrzeuge können eine Kooperation verweigern oder trotz Zusage ein vereinbartes Manöver

¹³ im Rahmen der Reichweite der Kommunikation und / oder der ACC-Verzögerungsgrenzen in Kombination mit Position und Geschwindigkeit des Umgebungsverkehrs sowie dem Erreichen einer konstanten Geschwindigkeit in ausreichendem Sicherheitsabstand hinter dem überholenden Lkw

nicht oder nur unvollständig ausführen. Weitere Störquellen sind plötzliche, nicht via V2I-Kommunikation angekündigte Überholverbote oder verkehrliche Störungen, wie etwa ein vorausliegendes Stauende, Unfälle oder herannahende Einsatzfahrzeuge.

Deutliches Optimierungspotenzial bezüglich des zeitlichen Ablaufs (Überholdauer) könnte z.B. durch eine kooperative Längsführung (vgl. Funktion F2) erreicht werden. Kann durch ein kooperatives Fahren mit Längsführung der minimale Sicherheitsabstand auf 30 m reduziert werden, dann würde sich der Überholweg und damit auch die Überholdauer um ca. 30% reduzieren.

6.2 Funktionszerlegung

Wie das Überholmanöver aus Sicht des Fahrers und des Fahrzeugs ablaufen könnte, zeigt zunächst Abbildung 6.5 als Übersichtsdarstellung mit den am Manöver beteiligten Akteuren und deren Rollen. Neben dem Überholer und dem zu Überholenden sind auch die Verkehrsinfrastruktur sowie der umgebende Verkehr beteiligt. Um ein erstes Verständnis für den Ablauf und wesentliche Bestandteile des kooperativen Lkw-Überholvorgangs zu erhalten, erscheint eine Zerlegung der Funktion in einzelne, weniger komplexe Phasen vorteilhaft.

Im nachfolgenden Unterkapitel soll die Funktionszerlegung zunächst aus Perspektive der beteiligten Fahrer mit einem Fokus auf die Mensch-Maschine-Interaktion sowie auf Inhalt und zeitliche Abfolge von Bedieneingaben und Systemrückmeldungen in Anzeigeelementen erfolgen.

Anschließend wird der Überholvorgang aus einer mehr technischen und fahrzeugbezogenen Sicht untersucht. Hierbei kann das Manöver in vier Phasen unterteilt werden: Sensierung, Umfeldmodellierung, Manöverplanung und Manöverdurchführung. In den verschiedenen Phasen können Verkehrsdaten sowie Empfehlungen seitens der Verkehrsinfrastruktur sowie der Umgebungsverkehr berücksichtigt werden.

Wie im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben wurde, kann angenommen werden, dass Effekte in Bezug auf Überholdauer, Kraftstoffverbrauch und Beeinträchtigung bei Überholmanövern von der gegebenen Ausbaustufe der Kooperation abhängig sind. Im Folgenden wird daher angenommen, dass die Kooperationsstufe mindestens IKS 4 beträgt und dementsprechend nicht nur Daten der Selbst- und Fremdwahrnehmung zwischen den Fahrzeugen via V2X-Kommunikation ausgetauscht werden, sondern auch zumindest eine bidirektionale Manöverabstimmung mit Einzelentscheidung stattfindet. Im Fall IKS 5 sind nachfolgende Ausführungen prinzipiell immer noch gültig, Phase 3 ist lediglich um die zusätzlichen Schritte zur verteilten Manöverplanung und Entscheidungsfindung zu erweitern.

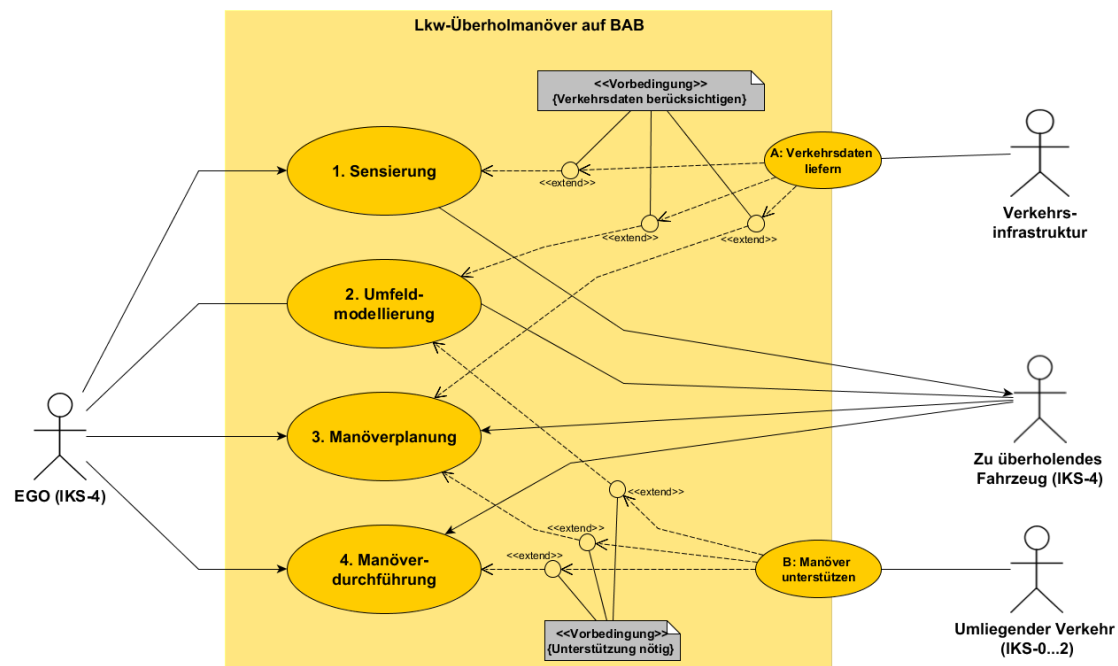


Abbildung 6.5: Big Picture Funktion F6 „Kooperatives Überholen durch Lkw auf Autobahnen“

6.2.1 Fahrersicht

Nachfolgend soll anhand von Interaktionstabellen und -diagrammen verdeutlicht werden, welche Interaktionen aus Sicht der beteiligten Fahrer beim Durchlaufen der einzelnen Phasen eines kooperativen Lkw-Überholvorgangs auf Autobahnen zwischen Fahrern und Mensch-Maschine-Schnittstelle der kooperativen Funktion stattfinden und wie die zeitliche Abfolge über die beteiligten Fahrzeuge (inkl. verteilter Anzeige- und Bedienevents) beim kooperativen Überholen aussehen könnte.

1. Sensierung und Umfeldmodellierung

Die Voraussetzung für die Durchführung eines kooperativen Überholmanövers ist zunächst, dass in allen beteiligten, mit kooperativer Technologie ausgestatteten Fahrzeugen die Systeme aktiviert sind. Ist ein Überholmanöver erforderlich, werden die Fahrer des zu überholenden Fahrzeugs und ggf. weiterer Fahrzeuge im Umgebungsverkehr um Kooperation gebeten und ihre Antworten an EGO übermittelt.

Sensierung & Umfeldmodellierung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Zu Überholender und Umgebungsverkehr/ Infrastruktur
Wer	System ist bereit („Überholassistent bereit“). Fahrer aktiviert den Überholassistent. Das System informiert den Fahrer, dass ein passendes Überholmanöver berechnet wird („Überholassistent aktiviert“) und schickt automatisch eine Kooperationsanfrage an den Umgebungsverkehr („Daten werden ermittelt“).	System ist bereit („Kooperationsassistent bereit“). Das System informiert den Fahrer über den Überholer („Kooperationsassistent aktiv – Überholer“). Der Fahrer wird gefragt, ob dieser kooperieren möchte („Kooperieren durch Halten der Geschwindigkeit“). Ergebnis wird an EGO geschickt („Daten werden übermittelt“). Verkehrsinfrastruktur gibt strategischen Support.
Wann		
Was		
Wie		
Wie lange		
Wo		
Abbruchvarianten	• System steht nicht zur Verfügung (div. Gründe) • Systemabbruch	

Tabelle 6.3: Interaktionen aus Fahrersicht in Phasen 1 und 2 der Funktion F6

2. Manöverplanung

Wurde grundsätzlich ein kooperatives Überholmanöver vereinbart, so erhalten die Fahrer Informationen über Ort bzw. Zeitpunkt und Ablauf des bevorstehenden Manövers.

Manöverplanung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Zu Überholender und Umgebungsverkehr
Wer	System informiert den Fahrer, dass passende Kooperationspartner gefunden wurden („Kooperation vereinbart“). Fahrer bestätigt Kooperation. System gibt Anweisungen, wie das Überholmanöver stattfindet („in 250 m Blinker setzen“).	System ist aktiv und gibt dem Fahrer Anweisungen („in 500 m auf die linke Spur wechseln“ (Umgebungsverkehr) oder „Geschwindigkeit in den nächsten 1000 m konstant halten“ (zu Überholender)).
Wann		
Was		
Wie		
Wie lange		
Wo		
Abbruchvarianten	• Systemabbruch • Kein kooperativer Partner • Kein geeignetes Überholszenario	

Tabelle 6.4: Interaktionen aus Fahrersicht in Phase 3 „Manöverplanung“ der Funktion F6

3. Manöverdurchführung

Ist der geeignete Zeitpunkt für die Durchführung des Manövers erreicht, so erhalten die beteiligten Akteure für die Dauer des Überholvorgangs konkrete Anweisungen über von ihnen umzusetzende Teilaufgaben. In einem beispielhaften Szenario könnte der Überholer etwa zum Spurwechsel, ggf. beteiligte Fahrzeuge im Umgebungsverkehr ebenfalls zu einem Spurwechsel oder zur Verringerung der Geschwindigkeit aufgefordert werden sowie der zu Überholende beispielsweise zum Halten seiner Geschwindigkeit.

Manöver- durchführung	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Zu Überholender und Umgebungsverkehr
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	System informiert den Fahrer, dass Überholvorgang gestartet werden darf („Überholmanöver starten – bitte Spur wechseln“).	System ist aktiv und gibt dem Fahrer Anweisungen („Jetzt auf die linke Spur wechseln“ (Umgebungsverkehr) oder „noch 500 m Geschwindigkeit konstant halten“ (zu Überholender)).
Abbruch- varianten	• Systemabbruch • Fahrer übersteuert • Kooperative Partner übersteuern • Dritte „stören“ • Voraussetzungen ändern sich	

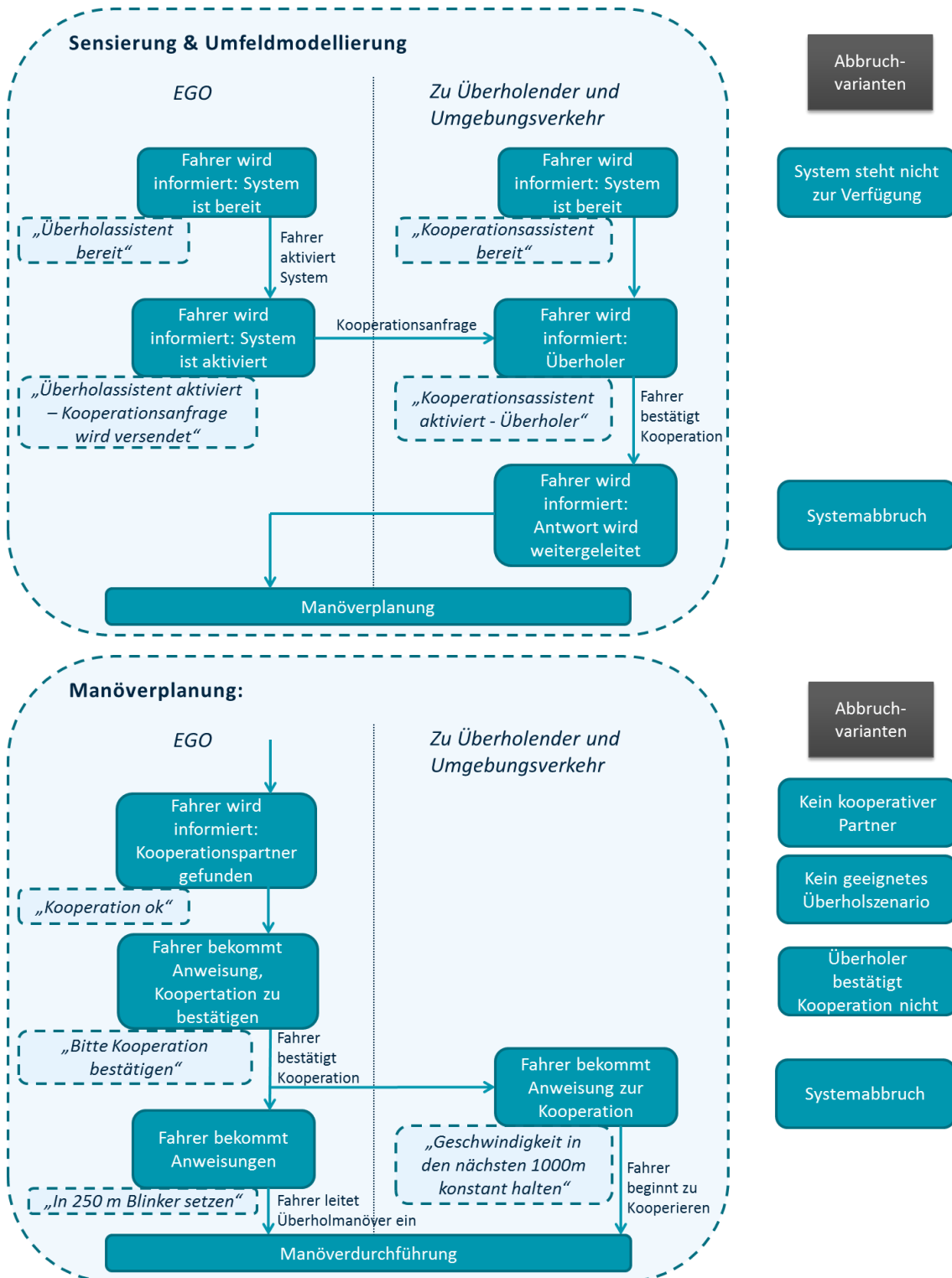
Tabelle 6.5: Interaktionen aus Fahrersicht bei Manöverdurchführung der Funktion F6

4. Manöverabschluss

Das Vorgehen der Manöverdurchführung gilt in analoger Weise auch beim Manöverabschluss: Ist der Zeitpunkt für ein Wiedereinscheren gekommen, erhält der Fahrer in EGO erneut eine Aufforderung zum Wechsel der Fahrspur. Nach Abschluss des Manövers (z.B. Überholer befindet sich wieder auf der ursprünglichen Fahrspur) erhalten alle Beteiligten eine Erfolgsmeldung über die jeweiligen Anzeigeelemente.

Manöver- abschluss	Basic Flow – Ego-Fahrer	Basic Flow – Zu Überholender und Umgebungsverkehr
Wer Wann Was Wie Wie lange Wo	System gibt Fahrer Rückmeldung, dass er Überholmanöver beenden kann („Überholmanöver beenden – bitte Spur wechseln“)	System gibt Fahrer Anweisung („Lichthupe betätigen“). System meldet erfolgreiche Kooperation („Kooperation erfolgreich. Danke!“). System schaltet sich aus.
Abbruch- varianten	• Systemabbruch	

Tabelle 6.6: Interaktionen aus Fahrersicht beim Manöverabschluss der Funktion F6



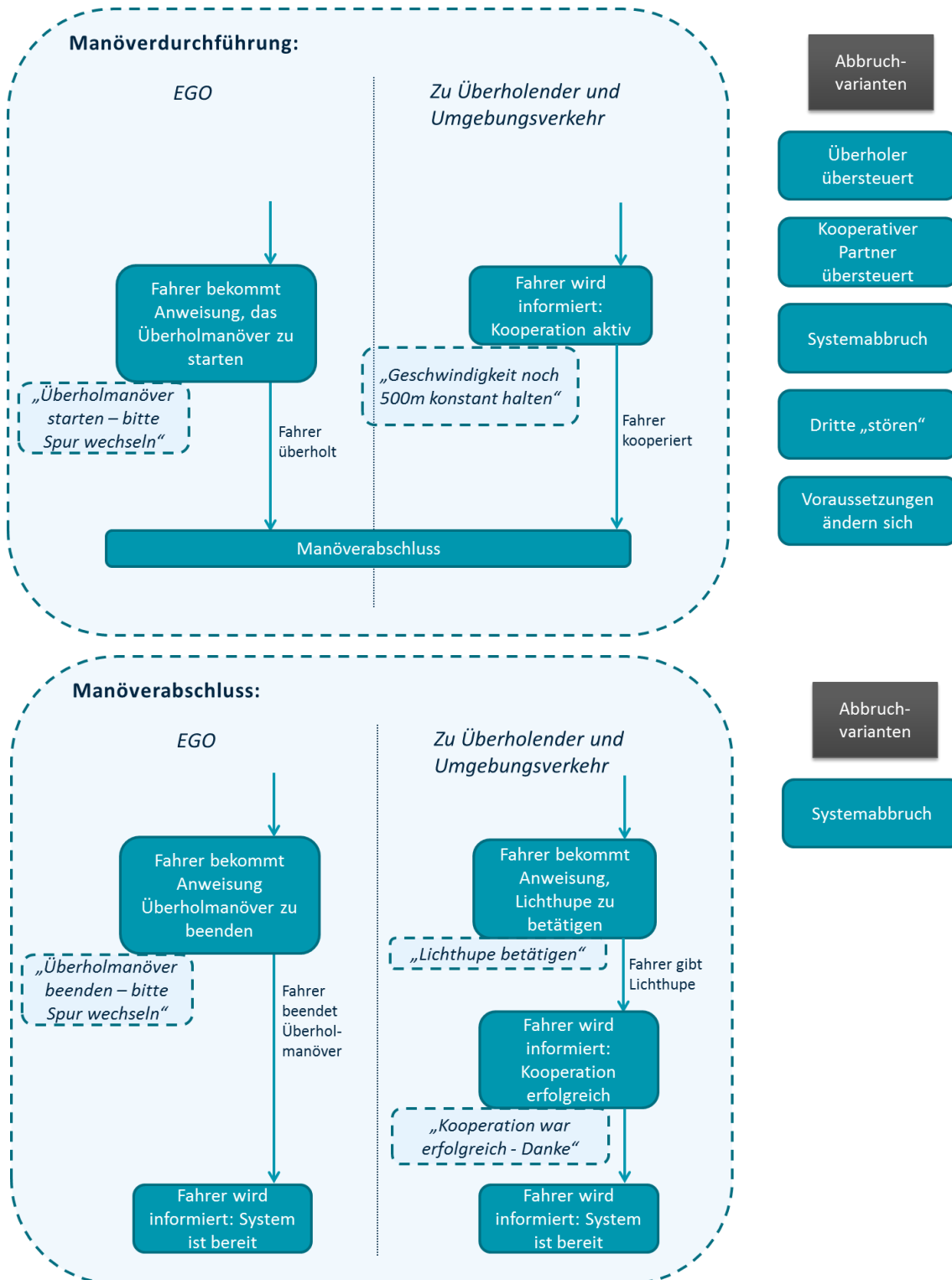


Abbildung 6.6: Interaktionsdiagramm der Funktion F6 aus Fahrersicht

Aus den Tabellen und Diagrammen aus Fahrersicht ergeben sich folgende Fragen zur MMI-Gestaltung (keine vollständige Liste):

- Muss ein System aktiviert werden oder ist es immer im Hintergrund aktiv?
- Wird das Senden einer Kooperationsanfrage vom System oder dem Überholer initiiert?
- Erfolgt die Antwort/ Reaktion auf die Kooperationsanfrage vom System oder dem zu Überholenden bzw. Umgebungsverkehr? Wenn vom Überholenden bzw. Umgebungsverkehr, wie?
- Muss der Überholer das abgestimmte Überholmanöver nochmals bestätigen? Wenn ja, wie?
- Muss der zu Überholende bzw. Umgebungsverkehr das abgestimmte Überholmanöver noch mal explizit bestätigen? Wenn ja, wie?
- Welche Informationen benötigen die jeweiligen Kooperationspartner in den jeweiligen Modi des Überholmanövers?
- Gibt es in der Informationsbereitstellung Unterschiede zwischen Überholenden und Umgebungsverkehr?
- Woher weiß der Fahrer, wer an der Kooperation teilnimmt? Wie wird mit Fahrzeugen umgegangen, die nicht an der Kooperation beteiligt sind (z.B. keine entsprechende Systemausrüstung oder Kooperationsanfrage abgelehnt)? Werden diese im MMI berücksichtigt? Gibt es eine maximale Anzahl an Fahrzeugen in der Umgebung, die angefragt/angezeigt werden?
- Wie teilt der Überholende dem Überholer mit, dass er wieder einscheren kann? Übernimmt dies das System oder der Fahrer?
- Inwieweit kann der Umgebungsverkehr tatsächlich bei starkem Verkehrsaufkommen kooperieren? Werden die Anweisungen (z.B. „in 500 m auf die linke Spur wechseln“) als Handlungsempfehlungen verstanden?
- Über welche Störungen werden die jeweiligen Kooperationspartner informiert? Und wie werden sie informiert – insbesondere bei einem Systemabbruch?

6.2.2 Fahrzeugsicht

1. Phasen 1 und 2 „Sensierung“ und „Umfeldmodellierung“

Der Schritt „Sensierung“ ist Voraussetzung für den kooperativen Überholvorgang. Die zur Verfügung stehenden Informationen der Selbst- und Umfeldwahrnehmung des Fahrzeugs EGO und über V2X-Kommunikation empfangene Daten werden gesammelt. Letztere umfassen Daten der Selbst- und Umfeldwahrnehmung des zu überholenden Fahrzeugs und ggf. weiterer Fahrzeuge des umliegenden Verkehrs, sowie Daten der Verkehrsinfrastruktur, wie etwa der weitere Streckenverlauf, das Verkehrsaufkommen und Informationen über dauerhafte oder temporäre Limitierungen und Verbote.

Alle verfügbaren Informationen werden im zweiten Schritt „Umfeldmodellierung“ fusioniert, um eine möglichst umfassende Wissensbasis über die vorliegende Verkehrssituation zu generieren.

Beide Schritte werden während des Betriebs des Fahrzeugs EGO kontinuierlich fortlaufend ausgeführt, unabhängig davon, ob zum gegebenen Zeitpunkt ein konkreter Überholwunsch besteht. Da darüber hinaus eine starke funktionale Abhängigkeit zwischen beiden Phasen besteht, sollen diese im Folgenden gemeinsam betrachtet werden.

Tabelle 6.7 stellt den störungsfreien bzw. erfolgreichen Ablauf der Schritte „Sensierung und Umfeldmodellierung“ dar. Mögliche Alternativen, die sich während dieser Phase auch durch Störungen ergeben können, sind in Tabelle 6.8 dargestellt. Eine Priorisierung und Abarbeitung solcher Alternativen erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

EGO	Zu Überholender und Umgebungsverkehr	Verkehrsinfrastruktur
1.1 Streckeninfo und Verkehrsinformationen abrufen / empfangen (Input: Infrastrukturdaten)		1.2 Verkehrsinformationen liefern (strategischer Support)
1.3 Daten der Selbst- und Umfeldwahrnehmung abrufen (Sensorik + CAN-Verbund)	1.4 Daten der Selbst- und Umfeldwahrnehmung abrufen (Sensorik + CAN-Verbund)	
1.5 Daten der Selbst- und Umfeldwahrnehmung des zu überholenden Fahrzeugs und des umliegenden Verkehrs per V2V empfangen (Input: CAM/DENM + Sensordaten)	1.6 Daten der Selbst- und Umfeldwahrnehmung von EGO und des umliegenden Verkehrs per V2V empfangen (Input: CAM/DENM + Sensordaten)	1.2 Verkehrsinformationen liefern (strategischer Support)
1.7 Fusion der über eigene Sensorik und V2X-Kommunikation erfassten Daten zu einem Umfeldmodell (Input: 1.1, 1.3, 1.5)	Fusion der über eigene Sensorik und V2X-Kommunikation erfassten Daten zu einem Umfeldmodell	

Tabelle 6.7: Basic Flow zu den Phasen 1 und 2 „Sensierung“ und „Umfeldmodellierung“ der Funktion F6

Störungen	Alternativen	Folgen
S1.1 Ausfall der Kommunikation	ggf. Definition in TP2, 1.1. und 1.3. evtl. via Umfeldsensorik möglich	ggf. Definition in TP2
S1.2 Widersprüchliche / inkonsistente Umfeldinformationen	A1.1 Situationsbewertung der Fahrzeuge differiert	Keine Kooperation möglich, Funktion nicht verfügbar
S1.3 Fehler bei Lokalisierung (GNSS oder Karte)	A1.1 Situationsbewertung der Fahrzeuge differiert	Keine Kooperation möglich, Funktion nicht verfügbar
	A1.2 Informationen aus Verkehrsinfrastruktur nicht nutzbar	Keine Kooperation möglich, Funktion nicht verfügbar

Tabelle 6.8: Störungen und Alternativen in den Phasen 1 und 2 „Sensierung“ und „Umfeldmodellierung“ der Funktion F6

2. Phase 3 „Manöverplanung“

In der nächsten Phase soll eine Entscheidung auf Basis der beobachteten und empfangenen Daten getroffen werden, ob aus Fahrersicht ein Überholmanöver initiiert und durchgeführt werden kann. Dafür sind folgende Schritte nach Tabelle 6.9 notwendig, die teils auch sehr schnell hintereinander und gemeinsam ablaufen. Tabelle 6.10 zeigt denkbare Alternativen und Störungen sowie deren denkbare Folgen. Bei den innerhalb dieses Schrittes ausgetauschten Informationen handelt es sich neben den zyklisch übertragenen CAM / EPM zusätzlich um Manöverdaten.

EGO	Zu Überholender und Umgebungsverkehr	Verkehrsinfrastruktur
2.1 Überholwunsch erkennen und übermitteln		
	2.2 Überholabsicht empfangen	
2.3 Fahrstrategievergleich mit zu überholendem Fahrzeug unter Berücksichtigung von Infrastruktur und umliegendem Verkehr	2.3 Fahrstrategievergleich mit Überholer unter Berücksichtigung von Infrastruktur und umliegendem Verkehr	
2.4 Vorschlag für Manöver wird unterbreitet		
	2.5. Vorschlag für Manöver wird überprüft und bewertet	
	2.6. Manöर्वorschlag zustimmen	
2.7 Abfrage (Aufforderung) der Kooperationsbereitschaft des umliegenden Verkehrs		
		2.8. Umgebungsverkehr meldet Kooperationsbereitschaft
2.9. Abgestimmtes Manöver wird abschließend geprüft		
2.10 EGO teilt Kooperationspartnern den Beginn des Überholvorgangs mit		

Tabelle 6.9: Basic Flow in Phase 3 „Manöverplanung“ der Funktion F6

Störungen	Alternativen	Folgen
	A2.1 kein Überholwunsch	Fahrt außerhalb des Manövers
	A2.2 Überholwunsch wird obsolet	Fahrt außerhalb des Manövers
	A2.3 Zu Überholender fordert EGO zum Überholen auf	Basic Flow kann grundsätzlich genutzt werden, vorab gibt es zusätzliche Informationen vom zu Überholenden an EGO → Erkennung Überholwunsch
	A2.4 Zu Überholender ist nicht mit Kommunikation ausgestattet	ggf. Definition in TP2
	A2.5 Überholer ist nicht mit Kommunikation ausgestattet	ggf. Definition in TP2
S2.1 Ausfall der Kommunikation	2.1. ggf. mittels Umfeldsensorik möglich	ggf. Definition in TP2
	A2.6 Kooperation wird abgelehnt	Fahrt außerhalb des Manövers
	A2.7 EGO stimmt abgestimmtem Manöver nicht zu	Fahrt außerhalb des Manövers oder: Gegenangebot von EGO an zu Überholenden.
	A2.8 Überholwunsch besteht nicht mehr	Fahrt außerhalb des Manövers

Tabelle 6.10: Störungen und Alternativen in Phase 3 „Manöverplanung“ der Funktion F6

3. Phase 4 „Manöverdurchführung“

Die letzte Phase beinhaltet die Durchführung des im vorhergehenden Abschnitt vereinbarten und abgestimmten Überholmanövers. Hierbei wird laufend überwacht, ob die Voraussetzungen für den Überholvorgang noch erfüllt sind bzw. ob gegebenenfalls Störungen von Dritten vorliegen, die den Überholvorgang beeinträchtigen. Tabelle 6.11 zeigt in dieser Phase denkbare Alternativen und Störungen sowie deren denkbare Folgen. Bei den innerhalb dieses Schrittes ausgetauschten Informationen handelt es sich wie bereits im vorherigen Schritt neben den zyklisch übertragenen CAM / EPM zusätzlich um Manöverdaten.

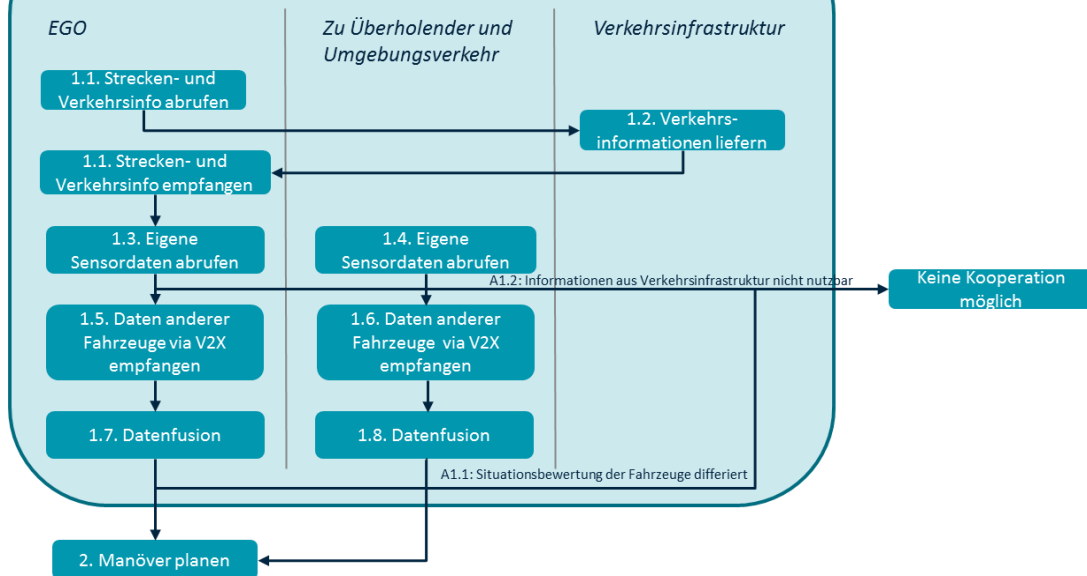
EGO	Zu Überholender und Umgebungsverkehr	Verkehrsinfrastruktur
3.1 Überholmanöver durchführen und Einhaltung der Abstimmung überwachen		
	3.2 Überholmanöver ermöglichen	
		3.3 Ggf. Überholmanöver unterstützen
3.4 Prüfen, ob sich die Voraussetzungen geändert haben.		
3.5 Manöver wie geplant beendet.	3.5 Manöver wie geplant beendet.	3.5 Manöver wie geplant beendet.

Tabelle 6.11: Basic Flow in Phase 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F6

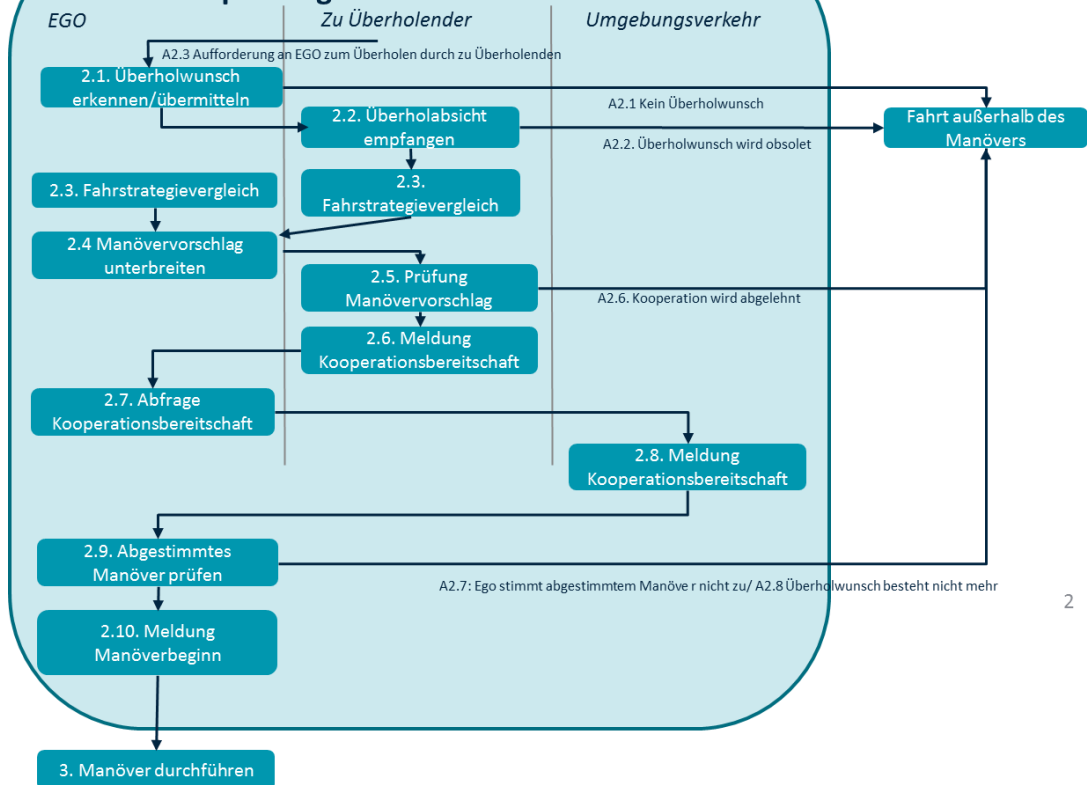
Störungen	Alternativen	Folgen
S3.1 Ein Akteur führt abgesprochenes Manöver nicht durch	<i>ggf. Definition in TP2 Hängt vom Zustand des Manövers bei Eintritt der Abweichung sowie von der Art der Abweichung ab.</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>
S3.2 Änderung der Voraussetzungen, unter denen das Manöver geplant wurde	<i>ggf. Definition in TP2 Hängt vom Zustand des Manövers bei Eintritt der Abweichung sowie von der Art der Abweichung ab.</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>
	A3.1 Überholwunsch besteht nicht mehr	Fahrt außerhalb des Manövers.
S3.3 Ausfall der Kommunikation	<i>ggf. Definition in TP2</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>
S3.4 Störung von „Dritten“ zuvor nicht am Manöver Beteiligten	<i>ggf. Definition in TP2 Hängt vom Zustand des Manövers bei Eintritt der Abweichung sowie von der Art der Abweichung ab.</i>	<i>ggf. Definition in TP2</i>

Tabelle 6.12: Alternativen und Störungen für Phase 4 „Manöverdurchführung“ der Funktion F6

1. Sensierung & Umfeldmodellierung



2. Manöverplanung



2

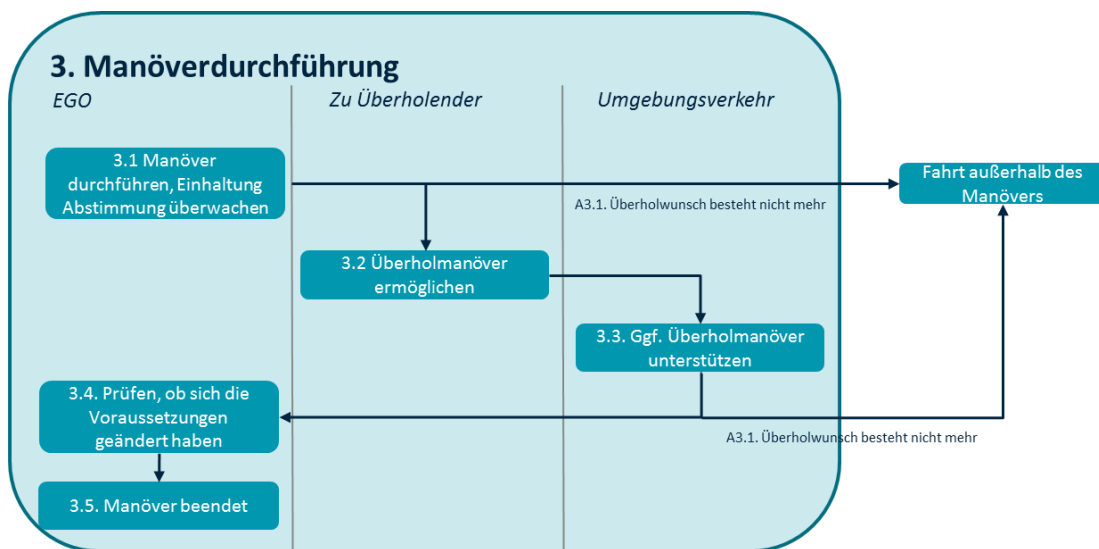


Abbildung 6.7: Interaktionsdiagramme der Funktion F6 aus Fahrzeugsicht

Sonstiges

Die nächsten beiden Tabellen zeigen der Vollständigkeit halber die Ablaufschritte des Basic Flow der Use Cases „Verkehrsinformationen liefern“ und „Manöver ermöglichen“. Diese betreffen die Akteure „Verkehrsinfrastruktur“ und „Umgebungsverkehr“ und werden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

EGO	Zu Überholender und Umgebungsverkehr	Verkehrsinfrastruktur
		5.1 Verkehrsinfrastruktur Verkehrsflussdaten und -informationen
		5.2 Empfehlung zur Durchführung des Überholmanövers aus Sicht der Verkehrsinfrastruktur

Tabelle 6.13: Basic Flow zum Use Case „Verkehrsinformationen liefern“

EGO	Zu Überholender und Umgebungsverkehr	Verkehrsinfrastruktur
		6.1 Fahrzustandsdaten übermitteln

Tabelle 6.14: Basic Flow zum Use Case „Fahrzustandsdaten übermitteln“ des Umgebungsverkehrs

6.3 Bestandsanalyse zu MMI-Konzepten und daraus abgeleitete Gestaltungsempfehlungen

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der Literaturanalyse sowie der sich daraus ergebenden Implikationen für das MMI gegeben.

6.3.1 Zusammenfassung des Literaturstands

Die Literaturanalyse gliedert sich in die Punkte gesetzliche Lage, Analyse des Überholvorgangs, psychologische Aspekte, Ergebnisse aus Verkehrsbeobachtungen, zeitliche Parameter der Fahrzeuginteraktion sowie Untersuchungen zu bestehenden Informations- bzw. Assistenzlösungen mit Fokus auf die Prädiktion von Spurwechselvorgängen und bestehenden MMI-Lösungen. Zu jedem Bereich werden im Folgenden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

Nach § 5 StVO darf ein Überholvorgang nur mit „wesentlich höherer Geschwindigkeit“ und unter Ausschluss einer Gefährdung des nachfolgenden Verkehrs und ohne Behinderung des Überholten stattfinden. Diese Aussagen präzisiert das OLG Hamm (Aktenzeichen 4 Ss OWi 629/08) dahingehend, dass es einen Lkw-Überholvorgang auf der Autobahn ab einer Dauer von 45 s für rechtswidrig befindet, sofern es nicht auf einer „ansonsten leeren zweispurigen Autobahn“ oder „zu verkehrsarmer Zeit auf einer dreispurigen Autobahn abspielt, und der schnellere Pkw-Verkehr ohne weiteres auf die dritte (äußere linke) Spur ausweichen kann“.

Nach Kretschmer et al. (2006, S. 5) lässt sich ein Überholmanöver in das Ausscheren, das Vorbeifahren und das Einscheren aufteilen. Da das Ausscheren und das Einscheren auf der Autobahn durch Spurwechsel erfolgen, werden auch Untersuchungen zu diesem Thema in der Literaturrecherche berücksichtigt. Schulze und Becke (2007, S. 262–263) untersuchen anhand von Messfahrten und Verkehrsbeobachtungen Bewegungsabläufe realer Lkw-Spurwechsel und kommen zu dem Ergebnis, dass dabei durchschnittliche Beschleunigungen von $0.2\text{--}0.6\text{ m/s}^2$ und maximale Querschleunigungen von $0.5\text{--}2.0\text{ m/s}^2$ auftreten. Zudem zeigen sie, dass sich die Spurwechselbahn der Lkw durch eine Sinuslinie annähern lässt und schließen daraus die Zeitpunkte, ab denen ein Spurwechsel für den nachfolgenden Verkehr frühestens erkennbar ist (15% der Zeit des gesamten Spurwechsels), bei dem ein Spurwechsel am wahrscheinlichsten ist (25% der Zeit des gesamten Spurwechsels) und ab dem die Spurbegrenzungslinie erstmals überschritten wird (30% der Zeit des gesamten Spurwechsels).

Im Rahmen einer Uniroyal Verkehrsuntersuchung befragten Ellinghaus und Steinbrecher (2002) Lkw- und Pkw-Fahrer zur gegenseitigen Beziehung im Straßenverkehr. Dabei kommen sie zu dem Schluss, dass Pkw-Fahrer eine „verallgemeinerte Angst“ vor Lkw haben, besonders, wenn sie diesen auf der Autobahn begegnen. Hauptkonfliktsituationen aus Sicht der Pkw-Fahrer sind das Blockieren der Überholspur durch Lkw und deren plötzliches Ausscheren. Folgerichtig wird das plötzliche Ausscheren von schweren Lkw als bedrohlichstes Fahrmanöver empfunden. Des Weiteren zeigte die Untersuchung, dass eine große Diskrepanz zwischen Selbst- und Fremdbild der Lkw-Fahrer besteht, was nach den Autoren einem „kooperativen Miteinander“ im Wege steht. Unter den Lkw-Fahrern konnte eine große in-group-Solidarität festgestellt werden, was

sich in kooperativen Gesten widerspiegelt. Beispielsweise geben 82% der Lkw-Fahrer an, einem überholenden Lkw durch die Lichthupe zu signalisieren, dass dieser wieder einscheren kann.

Neben den beschriebenen Befragungen umfasst die Untersuchung von Ellinghaus und Steinbrecher (2002) auch Ergebnisse aus Verkehrsbeobachtungen. Diese zeigen, dass die Geschwindigkeiten schwerer Lkw an Steigungen stark absinken und eine große Streuung aufweisen, was zu höheren Geschwindigkeitsdifferenzen zum Umgebungsverkehr führt. Auch auf Gefällestrrecken tritt dieses Phänomen, jedoch in abgeschwächter Form, auf.

Wie oben beschrieben ist die nicht ahndungswürdige Gesamtdauer des Überholvorgangs unter allgemeinen Verkehrsbedingungen durch den Gesetzgeber auf 45 s beschränkt. Die Dauer des Ein- und Ausschervorgangs von Lkw untersuchen Schulze und Becke (2007, S. 262–263) durch stationäre Verkehrsbeobachtungen. Sie gelangen zu dem Ergebnis, dass der Durchschnittswert aller Spurwechsel mit Anhänger bzw. Auflieger bei 8.1 s liegt. Der kürzeste beobachtete Spurwechsel erfolgte in 4.6 s, der längste in 18.2 s. Das 5. bzw. 95. Perzentil liegt bei 5.5 s bzw. 11.8 s, wodurch 90% der beobachteten Spurwechsel in diesem Bereich liegen. Unterschiede ergeben sich bei getrennter Betrachtung der Spurwechselrichtung. Spurwechsel nach rechts erfolgen mit durchschnittlich 7.6 s schneller als solche nach links mit durchschnittlich 8.5 s. Auch bei der Art des Zuges wurden Unterschiede festgestellt. Sattelzüge wechseln mit durchschnittlich 8.1 s schneller die Fahrbahn als Gliederzüge mit 8.4 s. Ohne Anhänger oder Auflieger wechseln Lkw die Spur bis zu 1.0 s schneller.

Untersuchungen zu Assistenzlösungen im Bereich des Überholvorgangs erfordern häufig eine Schätzung des Überhol- bzw. Spurwechselzeitpunkts. Naheliegende Indikatoren wie das Signal des Blinkers oder Schulterblicke treten nach Henning (2009), sofern sie überhaupt ausgeführt werden, zu spät auf. Auf Basis der Analyse der Daten der Naturalistic Driver Studies kommt Olsen (2003, S. 96) zu dem Schluss, dass der Blinker nur von 64% der Fahrer benutzt wird. Er fasst die Ergebnisse wie folgt zusammen:

- Viele Studien erzielen gute Resultate, wurden jedoch nur im Fahrsimulator durchgeführt.
- Studien mit hohen Erkennungsleistungen wurden nur mit wenigen Probanden durchgeführt. Studien mit vielen Probanden erzielen eher geringe Erkennungsleistungen.
- Einige Studien erkennen den Spurwechselzeitpunkt erst nachdem dieser erfolgt ist.

Die Analyse bestehender MMI-Konzepte ergibt keine Ergebnisse für ein Assistenzsystem, das den gesamten Überholvorgang unterstützt. Habenicht (2012) entwickelt in seiner Dissertation einen Fahrstreifenwechselassistenten, der eine Empfehlung zum Zeitpunkt des Spurwechsels verbunden mit Anweisungen zur Längsdynamikführung gibt. Es ist geplant, dass dafür vier MMI-Konzepte entwickelt werden, die in einem Display umgesetzt werden. Es wird eines der vier Konzepte basierend auf Expertenmeinungen ausgewählt. Studien zur Gestaltung bezüglich Informationsinhalt, Informationskanal etc. werden jedoch nicht angeführt.

6.3.2 Empfehlungen zur MMI-Gestaltung

Aus der Literaturanalyse lassen sich folgende Empfehlungen an die Funktion und deren Mensch-Maschine-Interaktion ableiten:

- Die Abstimmung des Überholzeitpunkts sollte sich nicht auf die direkt in das Überholmanöver involvierten Lkw und deren Fahrstrategie beschränken, sondern den Umgebungsverkehr als maßgebliche Entscheidungsgrundlage des Überholmanövers mitberücksichtigen.
- Fahrer im Umgebungsverkehr sollten rechtzeitig über ein geplantes Überholmanöver informiert werden, sofern sie sich auf der Zielspur des überholenden Lkw oder auf einer anderen von dem Manöver betroffenen Position befinden, damit das Ausscheren nicht als plötzlich eintretendes, bedrohliches Fahrmanöver empfunden wird.
- Da Pkw- und Lkw-Fahrer einer verzerrten Selbstwahrnehmung unterliegen sollte eine objektive Darstellung der eigenen Kooperationsleistung aller Verkehrsteilnehmer in Betracht gezogen werden.
- Neben dem Ausscheren ist auch das Einscheren nach dem Überholmanöver eine anspruchsvolle Aufgabe, da die Abstände zum Folgefahrzeug durch Anhänger oder Auflieger über große Distanzen abgeschätzt werden müssen. Hierbei sollte der Fahrer unterstützt werden, um nicht auf ein Zeichen per Lichthupe des Überholten angewiesen zu sein.
- Steigungen bieten sich aufgrund hoher Varianz der Fahrgeschwindigkeiten von Lkw als Überholort an. Jedoch ist hier auch die Differenzgeschwindigkeit zum Mitverkehr höher und die von der Verkehrssituation ausgehende Gefahr potenziell größer. Zu dieser Abwägung sollte die Funktion in Abhängigkeit von der konkreten Verkehrssituation fähig sein.
- Aufgrund fehlender Untersuchungen bezüglich der Gestaltung des MMIs sollten vor der Konzeptionierung grundsätzliche Studien durchgeführt werden, die die Akzeptanz der Lückengröße aus Sicht der Lkw-Fahrer, den Informationsbedarf des Fahrers, geeignete Informationskanäle sowie Ansätze zur Motivation aller beteiligten Fahrer untersuchen.

6.4 Weitere funktionspezifische Untersuchungsgegenstände

Im Rahmen der Use Case-Analyse wurden durch die Projektpartner eine Reihe von Fragestellungen identifiziert, die über die Perspektive, die TP1 einnimmt, hinaus gehen, die aber für die weitere inhaltliche Ausplanung der folgenden Teilprojekte TP2, TP3, TP4 bzw. TP5 relevant sein könnten:

- Identifikation/Bereitstellung/Kommunikation der Fahrparameter (unter anderem Geschwindigkeit) der beteiligten Fahrzeuge und deren Umgebungserfassung mit Sensoren (Umfeldmodell) sowie der aktuellen Position.
- Welche weiteren, für den Überholvorgang relevanten, per Kommunikation zu übertragenden Größen gibt es? Z.B. Fahrzeugparameter wie Masse, Motorisierung etc.
- Integration der kooperativen Perzeption in die Steuerungslogik.

- Geeignete Methoden (MMI) zur Information des Fahrers über die Funktion bzw. zur Unterstützung des Fahrers bei der Umsetzung.
- Strategischer Support durch Bereitstellung erweiterter Verkehrszustandsdaten vom Straßenbetreiber und deren Nutzung zur Entscheidungsfindung.
- Wie kann die vorliegende Situation dahingehend bewertet werden, ob ein geeigneter Zeitpunkt für einen Überholvorgang vorliegt?
- Wie kann die Einhaltung der vereinbarten Kooperation überwacht werden und welche Systemreaktionen sind im Fall einer Abweichung mindestens eines der beteiligten Akteure vom vereinbarten Plan erforderlich? Wie lassen sich Abweichungen vom geplanten Manöver quantifizieren und welcher Grad der Abweichung ist maximal zulässig? Welche Reaktionszeiten der Akteure sind insbesondere bei einem manuellen Betrieb zulässig?
- Wird einer der beteiligten Akteure zu einem Spurwechsel in einem definierten Zielabstand aufgefordert: Wie lässt sich in Gegenwart des umliegenden Verkehrs (ggf. mittels kollektiver Perzeption) sicherstellen, dass dies im Fall einer Zusage überhaupt möglich ist?

Außerdem erscheint eine eingehende Untersuchung folgender Fragestellungen im Rahmen des Projekts IMAGinE insbesondere auch im Rahmen einer Simulation sinnvoll:

- Wie lässt sich die durch Kooperation bei einem Lkw-Überholmanöver erzielte Verbesserung bewerten bzw. messen?
- Inwieweit erhöht sich das Kooperationspotenzial zwischen Lkw und Umgebungsverkehr bei drei Fahrstreifen?
- Welchen Einfluss auf kooperative Überholmanöver besitzen Störungen, die durch einen Kommunikationsabbruch, einen – ggf. trotz gegenteiliger Ankündigung – vorzeitigen Abbruch der Kooperation durch einen der Akteure, plötzlich auftretende Lkw-Überholverbote oder verkehrliche Störungen bedingt sind? Wie unterscheiden sich die Ergebnisse bei manueller im Vergleich zu automatischer Fahrt? Welche Systemreaktionen sind im Fall solcher Störungen sinnvoll bzw. erforderlich?
- Insbesondere der Einfluss der in IMAGinE vereinbarten Unverbindlichkeit von Kooperationsvereinbarungen ist diesbezüglich zu untersuchen.

Über die zuvor genannten Untersuchungsgegenstände hinausgehend sind auch die am Ende von Kapitel 6.2.1 zusammengefassten Fragestellungen in Bezug auf die Gestaltung des MMI zu berücksichtigen.

STICHWORTVERZEICHNIS

Big Picture 12, 22, 48, 70, 89, 113, 139
Deliverable D1.3 14
Fahrzeugdaten 26, 53, 85, 93, 94
Funktionsbaum 12, 19, 66, 86, 104, 133
Infrastrukturdaten 26, 36, 53, 86, 93, 94,
95, 145

Manöverdaten 26, 27, 96, 119, 148
strategischer Support 26, 93, 94, 95, 145,
155
TP2 27, 28, 29, 30, 37, 119, 120, 122, 123,
146, 148, 149
Trajektorie 20, 107, 122, 128, 131