



Forschungsinitiative Ko-FAS – Verbundprojekt Ko-PER

Fahrerassistenz und präventive Sicherheit mittels kooperativer Perzeption

Partnerübergreifender Schlussbericht

Förderkennzeichen (Gesamtprojekt)	19 S 9022
Förderkennzeichen der Projektpartner	19 S 9022 A 19 S 9022 K 19 S 9022 I 19 S 9022 F 19 S 9022 D 19 S 9022 E 19 S 9022 B 19 S 9022 J 19 S 9022 C 19 S 9022 G 19 S 9022 H
Projektbezeichnung	Kooperative Perzeption
Projektlaufzeit	01.10.2009 bis 30.11.2013
Berichtszeitraum	01.10.2009 bis 30.11.2013
Version	V 1.0

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kompiliert & editiert von: Reiner Wertheimer, WM&C (Projektsprecher)

Inhaltlich beitragende Autoren und Partner (Familiennamen alphabetisch geordnet):

Gabi Breuel, Daimler AG
Ulrich Brunsmann, Hochschule Aschaffenburg
Klaus Dietmayer, MRM, Universität Ulm
Konrad Doll, Hochschule Aschaffenburg
Martin Fritzsche, Daimler AG
Erich Fuchs, FORWISS, Universität Passau
Michael Goldhammer, Hochschule Aschaffenburg
Anselm Haselhoff, Delphi Deutschland GmbH
Florian Janda, FORWISS, Universität Passau
Dietmar Kasper, Daimler AG
Felix Klanner, BMW Group Forschung und Technik
Horst Kloeden, BMW Group Forschung und Technik
Sven Kopetzki, Delphi Deutschland GmbH
Sebastian Krug, ZENTEC GmbH
Roland Krzikalla, SICK AG
Martin Liebner, BMW Group Forschung und Technik
Daniel Meißner, MRM, Universität Ulm
Frederik Naujoks, IZVW, Universität Würzburg
Alexandra Neukum, IZVW, Universität Würzburg
Sebastian Papierok, Delphi Deutschland GmbH
Dominik Petrich, Daimler AG
Peter Quittenbaum, Continental Safety Engineering
International GmbH
Andreas Rauch, BMW Group Forschung und Technik
Florian Seeliger, MRM, Universität Ulm
Elias Strigel, MRM, MRM, Universität Ulm
Johannes Vetter, Continental Safety Engineering
International GmbH
Matthias Wankerl, ITE, Karlsruher Institut für Technologie
Andreas Wedel, Daimler AG
Galia Weidl, Daimler AG
Reiner Wertheimer Management & Consulting (WM&C)

Ergebnisverbreitung ✓ Öffentlich
✓ BMWi / Projektträger
✓ Ko-TAG
✓ Ko-PER
✓ Ko-KOMP

Dateiname 19-S-9022_Ko-PER_partnerübergreifender-Schlussbericht-öffentlich.docx

Seitenzahl 168

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung / Management Abstract	12
1.1	Stand von Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn	12
1.2	Begründung / Zielsetzung der Untersuchung	12
1.3	Angewandte Methoden.....	13
1.4	Erzielte Ergebnisse.....	14
1.5	Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten	18
2	Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung, Projektstruktur.....	20
3	AP: Herausforderungen, untersuchte Methoden, Ergebnisse	24
3.1	Fahrzeuglokale Perzeption (AP 2.400 und 2.500)	24
3.1.1	Fahrzeugausstattung und Spezifikation (AP 2.400)	24
3.1.1.1	Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	24
3.1.1.2	Erzielte Ergebnisse.....	24
3.1.2	Fahrzeuglokale Perzeption samt Tests (AP 2.500)	27
3.1.2.1	Verwendete Ansätze und Methoden	28
3.1.2.2	Erzielte Ergebnisse / durchgeführte Tests	29
3.2	Fahrzeugeigenlokalisierung (AP 2.600)	31
3.2.1	Aufgabenstellung, Anforderungen und Zielsetzungen.....	31
3.2.1.1	Ergebnisse.....	34
3.2.2	Hochpräzise digitale Karten.....	35
3.2.2.1	Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	36
3.2.2.2	Erzielte Ergebnisse.....	37
3.2.3	Landmarken, Video und Laserscanner.....	38
3.2.3.1	Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	38
3.2.3.2	Erzielte Ergebnisse.....	40
3.2.4	Landmarken und Laserscanner alleine (TAP 2.640).....	41
3.2.4.1	Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	42
3.2.4.2	Erzielte Ergebnisse.....	44
3.2.5	Tightly Coupled GNSS/INS.....	48
3.2.5.1	Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	48
3.2.5.2	Erzielte Ergebnisse.....	52
3.2.6	Kooperative Lokalisierung	53
3.2.6.1	Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	54
3.2.6.2	Erzielte Ergebnisse.....	55
3.2.6.3	Fazit und Ausblick	57
3.2.7	Lokalisierung mit aktiven Ko-TAG Transpondern (TAP 2.670)	57
3.2.7.1	Lokalisierung mittels Ko-TAG 1.0.....	58
3.2.7.2	Lokalisierung mittels Ko-TAG 2.0.....	63
3.2.8	Informationsfusion verschiedener Lokalisierungsergebnisse (TAP 2.680)	70
3.2.8.1	Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	70
3.2.8.2	Erzielte Ergebnisse.....	71
3.2.9	Abschließende Bewertung der verschiedenen Lokalisierungsansätze	74
3.3	Kreuzungsperzeption (AP 2.200 und 2.300)	76
3.3.1	Aufgabenstellung und Zielsetzungen.....	76
3.3.1.1	Aufbau, Betrieb und Instandhaltung der Kreuzungen	76
3.3.1.2	Anforderungen an die öffentliche Musterkreuzung, Spezifikationen, Hardwareausstattung und datentechnische Repräsentation	77

3.3.1.3	Algorithmenentwicklung zur Kreuzungsperzeption	77
3.3.1.4	Perzeptionstest Kreuzung, Kreuzungs-Messkampagnen und Lieferung von Datensätzen	77
3.3.2	Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	77
3.3.2.1	Aufbau und Betrieb der Musterkreuzungen	77
3.3.2.2	Arbeiten zur Kreuzungsperzeption	80
3.3.2.3	Kalibrierung der Sensoren.....	81
3.3.2.4	Objekterkennung	83
3.3.3	Ergebnisse	90
3.3.3.1	Aufbau und Betrieb der Versuchskreuzungen	90
3.3.3.2	Arbeiten zur Kreuzungsperzeption	92
3.3.3.3	Echtzeit-Präsentation	96
3.4	Drahtlose Kommunikation (AP 2.700)	96
3.4.1	Aufgabenstellung und Zielsetzungen.....	96
3.4.2	Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	96
3.4.2.1	Kanalkapazität	97
3.4.2.2	Übertragungsgüte (Fehlerraten).....	98
3.4.2.3	Datendefinition.....	98
3.4.2.4	Zeitverhalten	100
3.4.3	Ergebnisse	100
3.4.3.1	Kommunikationsreichweite / Antennencharakteristik.....	101
3.4.3.2	Sendeintervall vCPM.....	102
3.4.3.3	Innerstädtische Kommunikationsreichweite	103
3.5	(Fahrzeug-) Übergreifende Informationsfusion (AP 2.800)	105
3.5.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	105
3.5.2	Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	105
3.5.2.1	Systemanforderungen und Spezifikation	106
3.5.2.2	Assoziation kommunizierter Fahrumgebungsinformation	107
3.5.2.3	Fahrzeugübergreifende Fusion der verfügbaren Umgebungsinformation ..	107
3.5.2.4	Test und Evaluierung der fahrzeugübergreifenden Perzeption	107
3.5.3	Ergebnisse	109
3.5.3.1	Schnittstellen und Systemstruktur	110
3.5.3.2	Evaluierung.....	113
3.5.3.3	Zusammenfassung zu Abschnitt 2.5	114
3.6	Situationsanalyse, Risikoabschätzung (Teil von AP 2.a00)	115
3.6.1	Motivation und Kontext	115
3.6.2	Aufgabenstellung und Zielsetzungen.....	116
3.6.3	Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	116
3.6.3.1	Auswahl der Demonstrationsszenarien.....	117
3.6.3.2	Methoden der Situationsanalyse für Kooperativen Radfahrer- und Fußgängerschutz.....	118
3.6.3.3	Methoden der Situationsanalyse für Kreuzen und Amerikanisches Abbiegen	119
3.6.3.4	Methoden der Situationsanalyse für Fußgängerschutz bei querenden Fußgängern	121
3.7	Neue MMI Ansätze: Frühzeitige Fahrerinformation (AP 2.900)	121
3.7.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	121
3.7.2	Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten	122
3.7.2.1	TAP 2.910: Anforderungsanalyse und Definition der Prüfzenarien.....	123

3.7.2.2	TAP 2.920: Konzeptentwicklung und Methoden	124
3.7.2.3	TAP 2.930: MMI-Entwicklung und Implementation	127
3.7.2.4	TAP 2.940: Nutzerstudien in Labor und Fahrsimulator	127
3.7.3	Ergebnisse empirischer Untersuchungen.....	129
3.7.3.1	Studie I: Ermittlung des fahrerseitigen Unterstützungsbedarfs und Wirksamkeit einer prototypischen Fahrerunterstützung.....	129
3.7.3.2	Studie II: Untersuchung zum Informationszeitpunkt.....	131
3.7.3.3	Studie III: Untersuchung der Spezifität frühzeitiger Fahrerinformationen ...	132
3.7.3.4	Studie IV: Modalität und Einfluss falscher und unnötiger Informationen....	133
3.7.3.5	Studie V: Einfluss falscher Richtungsanzeigen	135
3.7.3.6	Zusammenfassung zu Abschnitt 2.7	137
3.8	Realisierte Fahrzeugfunktionen und Funktionstests (AP 2.a00+2.b00)	138
3.8.1	Fahrzeugfunktionen (AP 2.a00)	139
3.8.1.1	Kreuzen (Testszenario 3-1) und.....	139
3.8.1.2	Amerikanisches Abbiegen (Testszenario 4.2).....	139
3.8.1.3	Kooperativer Fußgängerschutz (Testszenario 5.1).....	141
3.8.1.4	Querender Fußgänger beim Rechtsabbiegen (Testszenario 5-2)	142
3.8.1.5	Kreuzender PKW – querender Radfahrer (Testszenario 6-1).....	143
3.8.1.6	Linksabbiegender PKW – querender VRU (Testszenario 6-3)	143
3.8.2	Funktionstests (AP 2.b00)	144
3.8.2.1	Aufgabenstellung, Zielsetzungen und Ergebnisse / Alleinstellungsmerkmale.....	144
3.8.2.2	Linksabbiegen mit verdecktem Gegenverkehr (Szenario 3-1).....	145
3.8.2.3	Kreuzen mit Sichtverdeckung (Szenario 4-2).....	145
3.8.2.4	Fußgänger überschreitet Fahrbahn (Szenario 5-1).....	147
3.8.2.5	Querender Fußgänger beim Rechtsabbiegen (Szenario 5.2)	148
3.8.2.6	Kreuzender PKW – querender Radfahrer (Szenario 6-1)	150
3.8.2.7	Linksabbiegender PKW – querender VRU (Szenario 6-3).....	150
3.9	In Kapitel 2 referenzierte Literatur	151
4	Wichtigste Ereignisse	153
4.1	Partnerkreistreffen Kleinheubach, Zwischen- & Schlusspräsentation.....	153
4.1.1	Ko-PER Beiträge zum Partnerkreistreffen Kleinheubach	153
4.1.2	Ko-PER Beiträge zur Ko-FAS Zwischenpräsentation.....	155
4.1.3	Ko-PER Beiträge zur Ko-FAS Abschlusspräsentation	156
4.2	Gastvorträge bei Ko-PER Konsortialtreffen.....	156
4.3	Mess- und Testkampagnen	157
5	Austausch / Schnittstellen mit anderen BMWi Förderprojekten	159
5.1	Austausch mit sim ^{TD} (Informationsaustausch und Lieferungen)	159
5.2	Schnittstelle zu Ko-TAG (Informationsaustausch und Lieferungen)	159
5.3	Schnittstelle zu Ko-KOMP (Informationsaustausch)	160
6	Ergebnisverbreitung	161
6.1	Konferenzbeiträge, Publikationen.....	161
6.2	Internet-Auftritt	161
6.3	Ko-PER spezifische Nachrichten (→ C2CCC)	163
6.4	Straßen- und Fahrstreifenverlauf / hochgenaue digitale Karten	164
6.5	Veröffentlichung von Kreuzungs-Sensordaten	164
6.6	Dissertationen.....	164
7	Anhang A (öffentlich): Publikationen und Konferenzbeiträge	165

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Unfälle mit Personenschäden (D 2012): Hauptkategorien und Häufigkeiten	20
Abbildung 2:	Schichtung der Ko-PER Informationsverarbeitungsmodule.	22
Abbildung 3:	Sensorerfassungsbereiche der Ko-PER Versuchsträger.....	25
Abbildung 4:	Einsatzbeispiel der SyncBox zur Zeitstempelung von CAN Nachrichten sowie der Triggerung von Schnappschüssen zur Sensordatenerfassung	25
Abbildung 5:	Die Steckerbuchsen für die HF-Schnittstellen auf der Vorderseite der CCU.....	26
Abbildung 6:	Beispiel-Dachträger für das RTK und TCS Positionierungssystem.....	26
Abbildung 7:	Statische und dynamische Objekte bei einer beispielhaften Kreuzungssituation.	28
Abbildung 8:	Erfassungsbereich der fahrzeuglokalen Perzeption des Fahrzeugtyps A bezüglich eines Fahrzeugs auf dem Nebenfahstreifen.....	28
Abbildung 9:	Unterteilung des Fahrzeugumfeldes in zwölf Felder	29
Abbildung 10:	Histogramm über Abweichungen der Position in X-Richtung.	30
Abbildung 11:	Histogramm über Abweichungen der Position in Y-Richtung.	30
Abbildung 12:	Anteil der innerhalb und außerhalb des 95% NEES Intervalls der Position.	31
Abbildung 13:	Elemente der digitalen Überlandkarte	36
Abbildung 14:	Die linke Grafik zeigt Streckenabschnitte mit verfügbarer digitaler Karte der Überlandstrecke im Norden von München.....	36
Abbildung 15:	Blockdiagramm: Lokalisierungsansatz basierend auf Bildfolgen- und Laserscanner-Auswertung.	38
Abbildung 16:	Assoziation von Messpunkten der Fahrspurerkennung mit Markierungslinien der digitalen Karte.	39
Abbildung 17:	longitudinaler Positionsfehler: $\mu=0,12$ [m], $\sigma=0,10$ [m]	40
Abbildung 18:	lateraler Positionsfehler: $\mu=0,38$ [m], $\sigma=0,17$ [m]	40
Abbildung 19:	Orientierungsfehler: $\mu=0,25$ [°], $\sigma=0,18$ [°]	41
Abbildung 20:	Ausschnitt eines Abschnitts der Münchner Überlandstrecke.....	41
Abbildung 21:	Funktionsprinzip der Fahrzeugeigenlokalisierung auf Basis von Laserscannern und Landmarken	42
Abbildung 22:	Belegungswahrscheinlichkeitskarte auf Basis von Laserscanner-Messungen und extrahierte Landmarkenkandidaten.....	43
Abbildung 23:	Ausgewertete Überlandstrecke nördlich von München.....	44
Abbildung 24:	Ausgewerteter Bereich an der Ko-PER Testkreuzung in Aschaffenburg	45
Abbildung 25:	Lateraler (oben), longitudinaler (Mitte) und gesamter Positionsfehler (unten) auf der Überlandstrecke, bezogen auf das Referenzsystem	45
Abbildung 26:	Orientierungsfehler auf der Überlandstrecke, bezogen auf das Referenzsystem	45
Abbildung 27:	Verfügbarkeit des Positionierungssystems in lateraler (links) und longitudinaler Richtung (rechts) in Bezug auf die Positionierungsgenauigkeit.....	46
Abbildung 28:	Lateraler (oben), longitudinaler (Mitte) und gesamter Positionsfehler (unten) im Kreuzungsbereich bezogen auf das Referenzsystem.....	47
Abbildung 29:	Orientierungsfehler im Kreuzungsbereich bezogen auf das Referenzsystem	47
Abbildung 30:	Verfügbarkeit des Positionierungssystems in lateraler (links) und longitudinaler Richtung (rechts)	47
Abbildung 31:	Hardwareübersicht TCS	51
Abbildung 32:	TCS Übersicht Systemkonzept	51
Abbildung 33:	Relativvektor zwischen zwei Fahrzeugen	53
Abbildung 34:	Hardware für die kooperative Lokalisierung.....	54
Abbildung 35:	Funktionsweise der Evaluierung	55
Abbildung 36:	Ergebnisse an der Kreuzung (Test 1).	56
Abbildung 37:	Ergebnisse an der Kreuzung (Test 2).	57
Abbildung 38:	Funktionsprinzip der Trilateration.....	58
Abbildung 39:	Antenne der <i>Onboard Unit</i>	58

Abbildung 40:	Roadside-TAG mit Holzstativ	59
Abbildung 41:	Arbeitsschritt Vorverarbeitung	59
Abbildung 42:	Arbeitsschritt Positionsberechnung	60
Abbildung 43:	Arbeitsschritt <i>Filtering</i>	60
Abbildung 44:	Testfeld in Aschaffenburg Nilkheim.....	61
Abbildung 45:	Test-Anordnung in Aschaffenburg Nilkheim	61
Abbildung 46:	Laterale, longitudinale und vertikale Abweichung der Ko-TAG 1.0 Eigenlokalisierung	62
Abbildung 47:	Orientierungsabweichung der Ko-TAG 1.0 Eigenlokalisierung zum Referenzsystem [°].....	62
Abbildung 48:	Verfügbarkeit der Ko-TAG 1.0 Eigenlokalisierung in lateraler (links), longitudinaler (rechts) Richtung sowie der Orientierung (unten)	63
Abbildung 49:	Bei der Initialisierung entstehen zwei Positionshypothesen durch die Schnittpunkte der Abstandsmessungen.....	64
Abbildung 50:	Kompensation der Verbauhöhe eines Transponders	65
Abbildung 51:	Prädiktion im Sensorkoordinatensystem.....	66
Abbildung 52:	Darstellung einer Testfahrt: Referenz, Rohdaten und Ergebnis des Filters.	67
Abbildung 53:	Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im <i>Heading</i> -Winkel aller Testfahrten unter Verwendung der Aschaffener Kreuzungsgeometrie bei geringer Geschwindigkeit.	68
Abbildung 54:	Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im <i>Heading</i> -Winkel aller Testfahrten	68
Abbildung 55:	Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im <i>Heading</i> -Winkel aller Testfahrten in der Aschaffener Kreuzung bei geringer Geschwindigkeit.	69
Abbildung 56:	Longitudinale und laterale Fehler sowie Fehler im <i>Heading</i> -Winkel aller Test- fahrten in der Aschaffener Kreuzung bei Geschwindigkeit von ca. 50 km/h	70
Abbildung 57:	Konzept der Eigenlokalisierungsfusion	71
Abbildung 58:	Versuchskreuzung in Aschaffenburg	72
Abbildung 59:	Absoluter Positionsfehler der beiden Fusionsstrategien	72
Abbildung 60:	Absoluter Ausrichtungsfehler der beiden Fusionsstrategien	73
Abbildung 61:	NEES der Fusion.....	74
Abbildung 62:	Aufbau der Testkreuzung in Ulm.....	78
Abbildung 63:	Aufbau der Versuchskreuzung Alzenau.....	78
Abbildung 64:	Aufbau der öffentlichen Musterkreuzung in Aschaffenburg	79
Abbildung 65:	Sensormontagebeispiele an der öffentlichen Versuchskreuzung in Aschaffenburg	79
Abbildung 66:	Überblick über das Ko-PER Kreuzungsperzeptionssystem.....	81
Abbildung 67:	Zu bestimmende Transformationen für das Kamerasystem	82
Abbildung 68:	Intrinsische Kalibrierung der Kameras	82
Abbildung 69:	Kalibrierobjekt zur simultanen Kalibrierung von Kamerasystem und Laserscanner-Netzwerk	82
Abbildung 70:	Blockschaltbild des Perzeptionssystems	83
Abbildung 71:	Grafische Darstellung des Gauß-Mixturen Model zur Hintergrundsubtraktion bei Laserscannern.....	84
Abbildung 72:	Auszug der Merkmale zur Klassifikation der Lasercluster	84
Abbildung 73:	Kaskadenstruktur des Fahrzeugdetektors	85
Abbildung 74:	Projektion der Bilddetektion auf die Straßenoberfläche zur Bestimmung der Weltkoordinaten	85
Abbildung 75:	Struktur der prototypischen Testanlage mit FIR-Kamera und der darin verwendeten Algorithmen	86
Abbildung 76:	Blickfeld der prototypischen Testanlage auf die öffentliche Ko-PER-Kreuzung	87
Abbildung 77:	Klassifikation der Loslaufbewegung mit dem MCHOG-Verfahren.....	87
Abbildung 78:	Anonymisierte bildliche Echtzeit-Darstellung des Kreuzungsverkehrs an der Versuchskreuzung Alzenau	88

Abbildung 79:	Beispiel Sensorfusion	89
Abbildung 80:	Bewegungsmodelle des Multi-Modell Filters.....	89
Abbildung 81:	Evaluationsbeispiel zur Kalibrierung der hochauflösenden Kameras an der Kreuzung Alzenau	91
Abbildung 82:	Laserscanner-Hypothese im Bild der hochauflösenden Kamera an der Kreuzung Alzenau	91
Abbildung 83:	Systemarchitektur der öffentlichen Kreuzung Aschaffenburg	92
Abbildung 84:	Gesichtsfelder der Video-Kameras an der öffentlichen Musterkreuzung	92
Abbildung 85:	Detektionsreichweite der Video- und Lasersensoren für Kraftfahrzeuge	93
Abbildung 86:	Beispielhaftes Ergebnis des Kreuzungstracking; Tracks eines Radfahrers, Fußgängers, LKW und mehrerer PKW	93
Abbildung 87:	Erkennung der Loslaufbewegung eines Projektmitarbeiters aus Sicht der hochauflösenden Kamera HK1 an der öffentlichen Kreuzung	94
Abbildung 88:	Zeitlicher Verlauf der mittleren Genauigkeit relativ zum manuell gelabelten <i>Heel-Off</i>	94
Abbildung 89:	Visualisierung der Kopfverfolgung	95
Abbildung 90:	Ergebnisse der Kopfverfolgung	95
Abbildung 91:	Ko-PER Fahrzeug-Kommunikationssystem	97
Abbildung 92:	Messszenario Reichweitenmessung / Funktionsprüfung	101
Abbildung 93:	Messszenario Reichweitenmessung / Funktionsprüfung	101
Abbildung 94:	Definition Sendeintervall	102
Abbildung 95:	vCPM-Sendeintervall.....	102
Abbildung 96:	Gefahrenre Route Versuchsträger Reichweitenmessung	103
Abbildung 97:	Innerstädtische Paketfehlerwahrscheinlichkeit über der Distanz	104
Abbildung 98:	Kartendarstellung der Kommunikationsreichweite an der Aschaffener Kreuzung	104
Abbildung 99:	Kommunizierte Umfeldinformation	105
Abbildung 100:	Fusionierte Umfeldinformation	105
Abbildung 101:	Schnittstellen der fahrzeugübergreifenden Informationsfusion.....	106
Abbildung 102:	Szenario Linksabbiegen mit Gegenverkehr	108
Abbildung 103:	Szenario Kreuzen.....	109
Abbildung 104:	Szenario Längsverkehr 1	109
Abbildung 105:	Szenario Längsverkehr 2	109
Abbildung 106:	Struktur der Fahrzeugübergreifenden Informationsfusion (Beispiel: MRM).....	110
Abbildung 107:	Sensor-2-Global-Fusionsarchitektur	111
Abbildung 108:	Beispiel: Vergrößerung der Positionsunsicherheit durch die Prädiktion	111
Abbildung 109:	Transformation empfangener Umfeld-Information in das Fusionskoordinatensystem	112
Abbildung 110:	Struktur der Assoziation	113
Abbildung 111:	Simulation des Assoziationsproblems an einer dicht befahrenen Kreuzung.....	114
Abbildung 112:	Aufgabenstellung und Zielsetzungen	116
Abbildung 113:	Auswahl der Szenarien	118
Abbildung 114:	Probabilistische Fahrstreifenzuordnung mit stochastischem Modell des Fahrzeugzustands.....	120
Abbildung 115:	Darstellung der örtlichen Überschneidung der Bewegungsprädiktionen (grün) für zwei Fahrzeuge.....	120
Abbildung 116:	Synchronisierte Funktions- und MMI-Entwicklung in Ko-PER	122
Abbildung 117:	Mehr als 80% aller in Deutschland polizeilich erfassten Unfälle werden zur Abschätzung des Potenzials von Fahrerassistenzsystemen nicht herangezogen.	123
Abbildung 118:	Ko-PER-Anwendungsfälle, Darstellungen in den Simulatoren der BMW Group Forschung und Technik GmbH (links) und der WIVW GmbH (mittig und rechts).	123
Abbildung 119:	Dynamischer und statischer Fahrsimulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften.	124

Abbildung 120:	Umsetzung der Szenarien-Varianten – Beispiel Verdeckung im Szenario „Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger“	125
Abbildung 121:	Nachbildung der Testkreuzung Aschaffenburg in der Fahrsimulation.	125
Abbildung 122:	Schematische Darstellung der Zeitfenster zur Fahrerunterstützung in den letzten Sekunden vor einer Kollision	126
Abbildung 123:	Beispielhafte Umsetzung einer kontaktanalogen Anzeige im HUD in der Fahrsimulation (links) und im Versuchsträger (rechts) der BMW Forschung und Technik GmbH	127
Abbildung 124:	Aufbau der Studienreihe zur Ausgestaltung der Ko-PER Mensch-Maschine Schnittstelle	128
Abbildung 125:	Aufbau der Studienreihe zur Absicherung der Mensch-Maschine-Schnittstelle.	129
Abbildung 126:	Bestimmung des Unterstützungsbedarfs und Wirkung der prototypischen Fahrerunterstützung	129
Abbildung 127:	Verteilung der innerstädtischen Unfälle in Deutschland in 2012	130
Abbildung 128:	Anteil kritischer Begegnungen	132
Abbildung 129:	Untersuchte visuelle Anzeigenvarianten der Mensch-Maschine-Schnittstelle (links) und Darstellung im Fahrsimulator der WIVW GmbH (rechts).	132
Abbildung 130:	Nützlichkeitsurteile (links) und minimale Time-to-arrival (rechts).	133
Abbildung 131:	Untersuchte Szenarien und MMI-Varianen.	133
Abbildung 132:	Anteil kritischer Begegnungen ($TTA_{min} < 1s$), Studienteil I	134
Abbildung 133:	Anteil kritischer Begegnungen ($TTA_{min} < 1s$), Studienteil II	135
Abbildung 134:	Anteil kritischer Begegnungen in den untersuchten Mehrfachkonflikten (links) und Veranschaulichung der Szenarien (rechts).	136
Abbildung 135:	Sukzessive Eingrenzung der Auswahl der Musterszenarien	138
Abbildung 136:	Qualitative Kriterien bei der Auswahl der Musterszenarien	138
Abbildung 137:	Warnung des Systemfahrzeugs (EGO) vor möglichen Kollisionen mit den beiden Objektfahrzeugen (PDO), trotz Sichtverdeckung durch einen Van.	139
Abbildung 138:	Verknüpfung von Situationsanalyse, MMI und Kollisionswahrscheinlichkeit für die rot dargestellten Trajektorien (A,B,C)	140
Abbildung 139:	Szenario 4-2, Kreuzen mit Verdeckung.	140
Abbildung 140:	Szenario 3-1, Linksabbiegen mit Gegenverkehr und Verdeckung	141
Abbildung 141:	Fußgänger mit Ko-TAG Transponder überschreitet Fahrbahn	141
Abbildung 142:	Architektur für die fahrzeugübergreifende Perzeption	142
Abbildung 143:	Rechtsabbieger bei der Zufahrt auf die Kreuzung. Die Sicht auf den Fußgänger ist durch Radbebauung verdeckt.	142
Abbildung 144:	Kreuzender PKW mit querendem Radfahrer	143
Abbildung 145:	Linksabbiegender PKW mit querendem Radfahrer	144
Abbildung 146:	Linksabbieger (rot) bei verdecktem Gegenverkehr (blau)	145
Abbildung 147:	Kreuzen bei Sichtverdeckung	146
Abbildung 148:	Realisierte Warnungen in Szenario 3.1 und 4.2	146
Abbildung 149:	Bremsvorgänge des Realverkehrs an der für Szenario 3.1 genutzten Linksabbiegespur der KAB	147
Abbildung 150:	Fußgänger überschreitet Fahrbahn	148
Abbildung 151:	Querender Fußgänger an Kreuzung	148
Abbildung 152:	Hinweis beim Rechtsabbiegen	149
Abbildung 153:	Informationsfluss Infrastruktur zu Fahrzeug	149
Abbildung 154:	Querender Radfahrer.	150
Abbildung 155:	Querender Radfahrer beim Linksabbiegen.	150
Abbildung 156:	Die Teilnehmer des Partnerkreistreffens der Forschungsinitiative Ko-FAS am 14. und 15. Oktober 2010 in Kleinheubach	154
Abbildung 157:	Bilder vom Ko-PER Auftritt bei der Ko-FAS Zwischenpräsentation	155
Abbildung 158:	Bilder vom Ko-PER Auftritt bei der Ko-FAS Schlusspräsentation	156
Abbildung 159:	Screenshot der Ko-FAS Homepage mit der Einführungsseite zu Ko-PER	162

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einzelkomponenten der drei Ko-PER Fahrzeug-Kategorien	27
Tabelle 2:	Zusammenfassende Übersicht der höchsten Anforderungen an die Fahrzeugeigenlokalisierung in Kreuzungsszenarien.....	32
Tabelle 3:	Zusammenfassende Übersicht der Anforderungen an die Fahrzeugeigenlokalisierung in ausgewählten Längsverkehrsszenarien.....	33
Tabelle 4:	Erfüllungsgrad der untersuchten Lokalisierungsansätze bzgl. Anforderungen des Kreuzungsverkehrs	34
Tabelle 5:	Erfüllungsgrad der untersuchten Lokalisierungsansätze bzgl. Anforderungen des Längsverkehrs	35
Tabelle 6:	Statistische Auswertung der Positionsabweichung von Fahrbahnmarkierungen mit und ohne Nutzung von Referenzpunkten zur Korrektur.....	37
Tabelle 7:	Statistische Daten über Fahrstreifen und Fahrbahnmarkierungen in der digitalen Überlandkarte	37
Tabelle 8:	Statistische Auswertung der Positionsabweichung der bereitgestellten Punktlandmarken mit den dazugehörigen Referenzwerten	38
Tabelle 9:	Mittelwert und Standardabweichung der Laserscanner-basierten Fahrzeugeigenlokalisierung auf der Überlandstrecke.....	46
Tabelle 10:	Mittelwert und Standardabweichung der Laserscanner-basierten Fahrzeug- Eigenlokalisierungslösung im Bereich der Aschaffener Versuchskreuzung.....	47
Tabelle 11:	Spezifikation der Anforderungen an den GNSS Rohdatenempfänger für TCS und Kooperative Lokalisierung mit GNSS, Quelle: Ergebnis zu TAP 2.650-2.....	50
Tabelle 12:	Aufteilung TCS-Einheiten auf Projektpartner und Versuchsträger	51
Tabelle 13:	Mittlerer absoluter Fehler für ein exemplarisches Szenario (Sensor-to-Global)	73
Tabelle 14:	Kanalbelegung und Kanalkapazität.....	97
Tabelle 15:	Fahrzeug übergreifende Informationsfusion - <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE).....	114
Tabelle 16:	Untersuchte Anwendungsfälle und Szenarien.	124
Tabelle 17:	Übersicht über untersuchte Szenarien.....	131
Tabelle 18:	Realisierte Warnzeiten (TTC) in den Szenarien 3.1 und 4.2	147
Tabelle 19:	Im Projektverlauf durchgeführte Messkampagnen	158
Tabelle 20:	Seitenstruktur des Bereichs "Ko-PER" auf der Homepage der Forschungsinitiative Ko-FAS.....	163

Verwendete Abkürzungen

AG	Arbeitsgruppe
AP	Arbeitspaket
C2C-CC	<i>Car2Car Communication Consortium</i>
CAM	<i>Cooperative Awareness Message</i>
CCU	<i>Communication Control Unit</i> (Kommunikations-Kontrolleinheit)
CPM	<i>Cooperative Perception Message</i>
DENM	<i>Decentralized Environmental Notification Message</i>
EIS	<i>Ego Information Structure</i> (erweiterter Informationsgehalt der CAM)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IPS	Infrastruktur-Perzeptionssystem / <i>Infrastructure Perception System</i>
KAB	(Versuchs-) Kreuzung Aschaffenburg
LCS	<i>Loosely Coupled (GNSS/INS) System</i>
LLH	<i>Longitude, Latitude, Height</i> (geographische Länge, Breite und Höhe)
MAP	Nachricht zur Übermittlung der Geometrie und Topologie von Kreuzungen
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MMS	Makromeilenstein
μMS	Mikromeilenstein (Aufgabenstellung eines Teilarbeitspakets)
NEES	<i>Normalized Estimation Error Squared</i>
PDO	<i>Perceived Dynamic Object</i>
Pose	als Pose eines Objekts wird dessen Position <u>und</u> Orientierung bezeichnet
PSO	<i>Perceived Static Object</i>
SitA	Situations-Analyse
SPaT	<i>Signal Phase and Timing (Message)</i>
TAP	Teilarbeitspaket
TCS	<i>Tightly Coupled (GNS/INS) System</i>
TP	Teilprojekt (partnerspezifischer Beitrag zum Projekt Ko-PER)
F / VPS	Fahrzeug-Perzeptionssystem / <i>Vehicle Perception System</i>
TelKo	Telefonkonferenz

1 Zusammenfassung / Management Abstract

1.1 Stand von Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

Nach Produkteinführung erster Systeme der aktiven Fahrzeugsicherheit, die 1966/1978 mit ABS und 1987 mit ESC ihren Anfang nahm¹, begann Ende der 1980er Jahre mit dem Verbundprojekt PROMETHEUS auf breiter Front die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, die sich vorausschauende Sensorik zunutze machen. Mit zunehmender Verfügbarkeit und Verlässlichkeit der mit den eingesetzten Sensoren und Datenauswertelgorithmen erzielbaren Perzeptionsergebnisse zeitigten diese Systeme kontinuierlich zunehmende Zuverlässigkeit, bis hin zur Teilautomatisierung von Fahrfunktionen, etwa beim autonomen Bremseneingriff. Darüber hinaus verhalf die im Jahre 2000 von der amerikanischen Regierung aufgehobene Selektive Verfügbarkeit (SV bzw. SA: *Selective Availability*) der GPS-Datengenauigkeit den fahrzeugbasierten Navigationssystemen zum Durchbruch.

Parallel hierzu vollzogen sich Fortschritte bei der drahtlosen Kommunikation zwischen Fahrzeugen (V2V bzw. C2C) sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (I2V bzw. I2C). Aufgrund der mit ersten Kommunikationssystemen verbundenen vergleichsweise großen Totzeiten bei der Nachrichtenübertragung, sowie der für Sicherheitsanwendungen auch nach Abschaffung der SV zu ungenauen Positionsgenauigkeiten des GPS (der zu erwartende Messfehler beträgt bei bis zu 10 % der GPS Navigationslösungen mehr als 10 m) dienten die entsprechenden Kommunikations-Prototypensysteme, ausschließlich der Information über statische bzw. langsam veränderliche Gegebenheiten (beispielsweise Stau- und Unfallinformationen, Warnung vor Straßenbaustellen, Übermittlung von Kreuzungskarten und dem Status von Lichtsignalanlagen, etc.). Eine Fahrer-Unterstützung bzw. Gefahrenwarnung im Bereich hochdynamischer Fahrumfelder, deren Kritikalität sich einer Zeitskala weniger Sekunden entwickelt, war damit noch nicht realisierbar.

In den Förderprojekten AKTIV und insbesondere in sim^{TD} wurde daraufhin eine auf WLAN-Standards aufbauende, für automobiler Anwendungen adaptierte Funktechnik eingesetzt und mittels der hierfür entwickelten Kommunikationseinheiten (CCU), im Feld erprobt. Die damit erzielbaren Totzeiten sind mit der Sekunden-Dynamik risikobehafteter Verkehrssituationen kompatibel, die Genauigkeit der verfügbaren Lokalisierungssysteme und der verwendeten Nachrichtenformate allerdings nicht. Zudem kommen die mit sim^{TD} Technologie realisierbaren kommunikationsbasierten Sicherheitsfunktionen lediglich jenen Verkehrsteilnehmern zugute, die mit einer CCU ausgestattet sind. Dies schließt verletzte Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer grundsätzlich aus. Überdies besteht bezüglich der auf Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (etwa dem Austausch von CAM Nachrichten) basierten Sicherheitsfunktionen das Problem der quadratischen Abhängigkeit der Wirksamkeit von der Ausstattungsrate. Nach einer im Zuge der Markteinführung anfänglichen Ausstattungsrate von immerhin 5 bzw. 10% ist die Wirksamkeit der V2V basierten Sicherheitsfunktionen auf maximal 0,25 bzw. 1,0% begrenzt.

Wie der vorliegende Bericht zeigt, wurden mit den Ergebnissen des Projekts Ko-PER durch die Kombination der Ergebnisse sensorbasierter, objektlokaler Perzeption (Fahrzeuge und Infrastruktur) mit drahtloser Kommunikation (basierend auf sim^{TD} Hard- und Firmware sowie eigens entwickelter, Ko-PER spezifischer Nachrichteninhalte) viele der angesprochenen Lücken bzw. Defizite überwunden.

1.2 Begründung / Zielsetzung der Untersuchung

Mit der zunehmenden Marktdurchdringung fahrzeuglokaler Systeme der aktiven Sicherheit, wie etwa Antiblockiersystem und elektronische Stabilitätskontrolle (ABS und ESC), Spurhalte- und Spurwechselassistent (LDA und LCA), Bremsassistenten (BAS) verschiedener Aus-

¹ Während ABS und ESC auf der Beobachtung fahrdynamischer Zustandsgrößen konkret: auf Radumdrehungsraten bzw. inertialen Messgrößen beruhen, zählen zu den „vorausschauenden“ Sensoren beispielsweise Radar, Lidar, Ultraschall und digitale Kameras.

prägung bis hin zu Autonomen Notbremssystemen (AEB), werden Unfallarten einfacheren Typs, beispielsweise Abkommen von der Fahrbahn, Unfälle bei Fahrstreifenwechsel oder Auffahren, in zunehmenden Maße vermieden bzw. entschärft. Dem entsprechend nimmt der relative Anteil der Unfälle in komplexeren Situationen kontinuierlich zu. So lag in 2012 der Anteil der Unfälle an Kreuzungen mit Verletzten in Deutschland bereits bei ca. 40% (14% Abbiegen, 23% Einbiegen sowie der Anteil der an Kreuzungen aufgetretenen Überschreiten-Unfälle (insgesamt 6%).

Komplexere Verkehrssituationen überfordern tendenziell die Wahrnehmungs- und Erkennungsleistungen menschlicher Fahrer, sei es aufgrund nicht einsehbarer Bereiche (Beispiele: durch Bebauung verdeckte Kreuzungsarme oder Verdeckungen durch größere Fahrzeuge, etwa LKW), durch die fehlende Möglichkeit zur simultanen Rundumsicht (Vorausschau/Rückspiegel) oder durch Ablenkung und/oder andere Defizite der Kognition („*looked but failed to see*“).

Die primäre Zielsetzung des Projekts bestand daher in der Beantwortung der Frage, inwieweit durch die drahtlose Kommunikation der Wahrnehmungsergebnisse fahrzeuglokaler und infrastrukturegebundener Sensornetzwerke und einer fortlaufenden, objektübergreifenden Fusion der entsprechenden Informationen nicht wesentliche Beiträge zur präventiven Sicherheit im Straßenverkehr geleistet werden können.

Die grundlegende Idee des Projekts Ko-PER ist daher folgende: Durch Zusammenlegung der Perzeptionsergebnisse diverser benachbarter Fahrzeuge, die eine Verkehrssituation aus verschiedensten Blickwinkeln wahrnehmen, sowie der Wahrnehmungsergebnisse infrastrukturegebundener Sensornetzwerke, etwa an unübersichtlichen Kreuzungen, soll eine weitgehend vollständige virtuelle Rundumsicht zu erzielt werden, um damit

- Verdeckungen aufzulösen, und den Fahrer frühzeitig auf sich entwickelnde Gefahrenpotenziale aufmerksam zu machen;
- den Fahrer in Situationen, die sein eigenes Wahrnehmungsvermögen überfordern, zu unterstützen;
- den Fahrer möglichst frühzeitig über unerwartetes Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer zu informieren („*advisory warning*“) beispielsweise bei Verletzung der Vorfahrt, gefährdendem Ausscheren, kreuzender, aus falscher Richtung kommende Radfahrer, etc.

Zur Verwirklichung der skizzierten Idee erforderlich sind

- die Herleitung der Erfordernisse und die Abschätzung des Potenzials derartiger Ansätze anhand verfügbarer *In-Depth* Unfalldaten im Sinne einer *Top-Down* Analyse,
- die Herleitung der Spezifikationen für die erforderlichen Komponenten und Module (*Bottom-Up* Ansatz),
- die Implementierung und Evaluierung der für die Realisierung der angestrebten Systeme erforderlichen Komponenten und Module,
- die Integration dieser Module zu den auf kooperativer Perzeption basierenden Sicherheitsfunktionen und schließlich
- der Nachweis der Machbarkeit und Wirksamkeit dieser Funktionen.

1.3 Angewandte Methoden

Zur Verwirklichung der oben skizzierten Zielsetzungen kamen folgende methodische Ansätze zum Einsatz:

- Analyse der Statistiken zum Unfallgeschehen insbesondere unter Verwendung verfügbarer *In-Depth* Untersuchungen; Herleitung, welche Unfalltypen bzw. Situationsrisikotypen durch Ansätze der kooperativen Perzeption vermieden bzw. entschärft werden können;
- objektübergreifende zeitliche Synchronisierung der Sensorausgaben bzw. Wahrnehmungsergebnisse;
- Installation und Kalibrierung von Sensornetzwerken an Versuchskreuzungen; Entwurf

und Entwicklung der erforderlichen Perzeptionssysteme; Entwicklung von Modulen zur Anonymisierung der Verkehrsteilnehmer (Gesichter und Fahrzeugkennzeichen) an öffentlichen Versuchskreuzungen;

- Implementierung und Untersuchung des Potenzials einer Vielzahl von Ansätzen zur fahrstreifengenauen Eigenlokalisierung; Sicherstellung der objektübergreifenden Kompatibilität der verwendeten Koordinatensysteme;
- fahrzeugübergreifende Tests zur Sicherstellung der Konsistenz und Genauigkeit der fahrzeuglokalen Perzeption und Eigenlokalisierung;
- Entwurf und Implementierung Ko-PER spezifischer Nachrichtentypen zur Kommunikation der Perzeptionsergebnisse mittels sim^{TD} Hard- und Firmware Technologie;
- Track-basierte objektübergreifende Informationsfusion, (weniger präzise auch: sensorferne Datenfusion);
- Entwurf, Implementierung und Test geeigneter Methoden zur Situationsanalyse;
- Entwicklung neuartiger MMI Ansätze: Stichwort: *Advisory Warning*; umfangreiche Wirksamkeits- und Akzeptanz-Untersuchungen im Fahrsimulator; Ableitung zeitlicher und inhaltlicher Anforderungen an die Situationsanalyse und Informationsübermittlung an den Fahrer;
- Fahrzeug-Systemintegration, Test der auf kooperativer Perzeption basierten präventiven Sicherheitsfunktionen.

Die im Projektverlauf eingesetzten Methoden werden im Hauptteil dieses Berichts im Einzelnen beschrieben.

1.4 Erzielte Ergebnisse

Das Verbundprojekt zeitigte eine Fülle von Ergebnissen, und zwar sowohl im Bereich der präventiven Sicherheit im Straßenverkehr an sich als auch bezüglich methodischer und technischer Fortschritte in einzelnen Teilgebieten. Erstere werden wie folgt zusammengefasst:

Zu den auf kooperativer Perzeption basierten präventiven Sicherheitsfunktionen ist zunächst anzumerken, dass sich nach derzeitiger Rechtslage autonome Eingriffe auf Basis drahtlos kommunizierter Information aus Gründen der Produkthaftpflicht verbieten. Von Wichtigkeit war es daher, statt eines buchstäblich in letzter Sekunde erfolgenden autonom ausgelösten Noteingriffs,

- das alternative **MMI**-Konzept der informationsbasierten Fahrerwarnung („*Advisory Warning*“) zu entwickeln. Dabei wird der Fahrer in geeigneter Weise auf ein sich entwickelndes Gefahrenpotenzial hingewiesen und hat damit hinreichend früh eigenständig die Möglichkeit, die jeweilige Gefahrensituation zu entschärfen. Mittels außerordentlich umfangreicher Fahrsimulator-Untersuchungen einer Vielzahl kritischer Szenarien (klassifiziert nach potenziellen Unfalltypen) wurde nachgewiesen, dass
 - der für den Fahrer optimale Informationszeitpunkt bei ca. 2s vor dem letztmöglichen Eingriff zur Vermeidung des Unfalls liegt,
 - die Spezifität der Warnung von eher sekundärer Bedeutung ist,
 - Falschinformationen, aufgrund der anfangs mit vergleichsweise geringer Kritikalität behafteten Situation und des vergleichsweise großen noch zur Verfügung stehenden Zeitbudgets zur Abwendung der Gefahr, überraschend großzügig toleriert werden und
 - in Summe die Kritikalität nahezu aller im Kreuzungs- und Längsverkehr auftretenden Situationen entscheidend reduziert werden kann, entsprechendes gilt auch für Fußgänger-Szenarien, insgesamt also für eine Vielzahl potenzieller Unfälle der Typkategorien 200, 300, 400 und 600.
- Diese im Bereich der MMI Arbeiten entwickelten und im Rahmen entsprechender empirischer Untersuchungen nachgewiesenen Konzepte sind klarerweise nur dann umsetzbar, wenn die Fahrumgebungserfassung („sensorbasierte Perzeption“) und

die darauf basierende Situationsanalyse („Szenenverständnis“) eine hinreichend frühe Risikoeinschätzung ermöglichen.

- Im Projektverlauf früh durchgeführte *Bottom-Up* Untersuchungen ergaben, dass rund 85% der Verkehrsszenarien die in Deutschland im Jahre 2009 zu schweren Unfällen führten zumindest im Prinzip mit Hilfe von fahrzeug- und/oder kreuzungslokalen Sensornetzwerken hinreichend genau erfasst werden können.
 - Die Einschätzung, dass der **Situationsanalyse (SitA)**, die aus Fahrerabsicht und Fahrumgebung die Bedeutung oder zumindest eine Risikoabschätzung der aktuell vorliegenden Situation ableitet, künftig ein entscheidender Stellenwert zukommt, erhärtete sich. Insbesondere in komplexeren Verkehrssituationen sowie im Falle rein kinematisch nicht fortschreibbarer Trajektorien (beispielsweise im Falle von Fußgängern) wird eine generische Situationsanalyse samt **Verkehrsteilnehmer-Absichtserkennung (VAE)** über die bisher übliche, bloße Trajektorien-Prädiktion hinaus kontinuierlich an Bedeutung gewinnen. Für die im Rahmen des Projekts in realen Fahrzeugen implementierten und demonstrierten Sicherheitsfunktionen zum Abbiegen, Einbiegen und Kreuzen (bei Gegenverkehr bzw. kreuzenden Fahrzeugen) sowie zum Fußgänger- und Radfahrerschutz wurden nicht nur wichtige Aspekte zur SitA und VAE erarbeitet, sondern auch entsprechende, situationspezifische Ergebnisse erzielt.
 - Letztere dienen schlussendlich als Eingangsgrößen für entsprechende Fahrerwarnungen. Bei allen realisierten Szenarien bzw. **Fahrzeug-Sicherheitsfunktionen** konnte die vorgegebene Zeitreserve „2s vor letztmöglichem Eingriff“ eingehalten werden; die Voraussetzungen des Konzepts *Advisory Warning* wurden mithin erfüllt. Ein Teil der den verletzlichen Verkehrsteilnehmern gewidmeten Funktionen basierte dabei auf kooperativer Sensorik, d.h. auf der Wahrnehmung mittels aktiver Transponder-Technologie, wie sie im Schwesterprojekt Ko-TAG entwickelt worden war.
- Die oben skizzierte SitA und VAE basiert auf einer weitgehend vollständigen Fahrumfeld-Erfassung, die ihrerseits das Ergebnis der Fusion von Informationen verschiedener fahrzeug- und kreuzungsbasierter Sensornetzwerke darstellt (**Track-basierte netzwerkübergreifende Informationsfusion**). Bei den entsprechenden Fusionsalgorithmen treten gegenüber lokalen Fusionsansätzen folgende besondere Herausforderungen auf:
- Die Informationsübertragung zwischen den Sensornetzwerken ist zum einen mit zusätzlichen, ggf. zeitlich variablen Totzeiten und zum anderen mit potenziellen Teilverlusten an Informationen verbunden. Dies erfordert besondere Maßnahmen zur zeitlichen Angleichung der kommunizierten Informationen.
 - Ungenauigkeiten in der Objekt- und Eigenlokalisierung erschweren die räumliche Assoziation im Falle redundanter Objektinformation.
 - Unabhängig davon haben sich die kommunizierenden Systeme bzw. die kommunizierten Informationen notwendig auf widerspruchsfrei vereinbarte Koordinatensysteme zu beziehen, um eine geometrisch konsistente Umfeld-Erfassung zu gewährleisten.

Im Projektverlauf wurden eine umfassende Konvention der zu verwendenden Koordinatensysteme sowie eine ausführliche Formelsammlung zu deren Transformationseigenschaften entwickelt. Im Einzelnen wird unterschieden zwischen Sensor-, GNSS-Empfangsantennen-, Fahrzeug-, Navigations- und georeferenziertem WGS-84-Koordinatensystem; nur das letztgenannte ist für alle Fahrzeuge und Infrastruktureinrichtungen identisch. (Bei der Bestimmung der Koordinaten von Fremdfahrzeugen besonders zu beachten ist die Festlegung sensorisch erfassbarer Punkte, etwa die „Ecken“ und „Mitten“ des den Fahrzeuggrundriss umschreibenden Rechtecks bzw. dessen Projektion auf die Fahrbahnoberfläche). – Bezüglich der Assoziationsmethode erwies sich eine (aus Gründen der Echtzeitanforderungen vereinfachte) Variante der sog. *Joint Probabilistic Data Association* als vorteilhaft. Sie liefert wie auch der

Auction-Algorithmus ein global optimales Assoziationsergebnis, erzeugt jedoch statt einer binären Assoziation probabilistisch gewichtete Zuordnungen. Bei der zeitlichen Angleichung der kommunizierten Objektinformationen (den sog. Tracks) erwies es sich als vorteilhaft, diese schon im sendenden Fahrzeug auf ein festes Zeitraster zu beziehen, was durch Verwendung des globalen Zeittakts (die Sekundenpulse) des verwendeten GNSS erreicht wird.

- **Drahtlose Kommunikation / Ko-PER spezifische Nachrichten:** Zur drahtlosen Übermittlung der Ergebnisse objektlokaler Wahrnehmung wurde im Projektverlauf ein Satz Ko-PER spezifischer Nachrichten spezifiziert und implementiert. Im Einzelnen handelt es sich dabei um
 - die *Cooperative Perception Message*, in der neben statischen und dynamischen Informationen über den Sender ein Feld (Array) sensorisch gewonnener statischer und dynamischer Objektinformationen (die sog. Object-Tracks) übertragen wird,
 - die *Cooperative Localization Message*, in der die vom Sender empfangenen Satelliten Rohdaten sowie die lokale Navigationslösung nebst Informationen über den Sender übertragen werden; ihrem Namen gemäß dient diese Nachricht der kooperativen Lokalisierung (Motivation: Eliminierung systematischer Fehler in den Satelliten Rohdaten),
 - verschiedene neue Typen von DEN Nachrichten (*Decentralized Event Notification*) zur Warnung vor plötzlich auftretenden Gefahrensituationen, nämlich die SVC (*Sudden Velocity Change*), drei Varianten der SLD (*Sudden Lateral Displacement*) zur Charakterisierung des in nächster Zukunft zu erwartenden dynamischen Verhaltens des sendenden Fahrzeugs sowie die PED / BIC / CYC zur Beschreibung des unmittelbar bevorstehenden Verhaltens verletzlicher Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Rad- und Motorradfahrer). Im Falle motorisierter Verkehrsteilnehmer wird die entsprechende DEN Nachricht bevorzugt vom gefährdenden Teilnehmer generiert: Aufgrund der frühen Kenntnis der fahrzeuglokalen Stellgrößen und der lokalen dynamischen Parameter wird ein im Vergleich zur Fremdbeobachtung signifikanter Zeit- und Präzisionsgewinn erzielt. Für Fußgänger und Radfahrer gilt dies in abgeschwächter Form analog, sofern diese beispielsweise Träger eines (Ko-TAG) Transponders sind.

Neben den Ko-PER Nachrichten wurden aus Gründen der Kompatibilität die in sim^{TD} verwendeten Nachrichtentypen CAM, SPaT und MAP implementiert. Als Hardware wurden die in sim^{TD} genutzten Kommunikationseinheiten (CCU) eingesetzt.

- Wie bereits oben erwähnt, sind zur korrekten Lokalisierung bzw. Assoziation der durch Eigen- und Fremdbeobachtung gewonnenen Objektinformation präzise Angaben über die sog. Pose, d.h. **Ort und Orientierung des Beobachters** sowie über den **Zeitpunkt der Beobachtung** erforderlich. Insbesondere bei Sendern, die für den Empfänger verdeckt sind, ist hierbei die **Kenntnis der georeferenzierten Position** des Senders unerlässlich. Im Falle stationärer Sensornetzwerke, etwa an Kreuzungen, ist dies kein grundsätzliches Problem, da die Position des Kreuzungsreferenzpunktes bei Bedarf cm-genau eingemessen werden kann; entsprechendes gilt für eine hinreichend präzise zeitliche Quasi-Synchronisierung, zu der das mittels relativistischer Korrektur erdglobal gültige GNSS Zeitraster herangezogen werden kann (beispielsweise durch Verwendung der GPS PPS-Signale). Eine große Herausforderung stellt dagegen die **hinreichend genaue räumliche Fahrzeug-Eigenlokalisierung** dar. Die für die präventive Sicherheit *mindestens* zu erfüllenden Genauigkeitsanforderungen für die Fahrzeugposition im geostationären Koordinatensystem betragen dabei: eine halbe Fahrzeuglänge, eine halbe Spurbreite und 1° bei der Fahrzeug-Orientierung.

Aufgrund der Herausforderung, die genannten Anforderungen zu erfüllen, wurde in Ko-PER das Potenzial verschiedener Ansätze untersucht, nämlich die Fahrzeug-Eigenlokalisierung mittels

- Laserscanner und Landmarken in Verbindung mit hochgenauen digitalen Karten,
- Laserscanner, Videokamera und Landmarken in Verbindung mit hochgenauen digitalen Karten,
- TCS = Tightly Coupled GNSS/INS (frühe Fusion von Satelliten- und Inertial-Daten),
- Lokalisierung mit Ko-TAG Transpondern,
- Kooperative Lokalisierung (Einbeziehung WLAN-kommunizierter Satelliten-Rohsignale) und die
- Fusion verschiedener vorgenannter Lokalisierungsansätze.

Das Ergebnis der Untersuchungen zum Potenzial der genannten Ansätze wird weiter unten im Detail beschrieben. Hier sei zusammenfassend lediglich Folgendes angemerkt:

Für die kooperative Lokalisierung sowie auf Ko-TAG Transpondern (1. und 2. Generation) basierte Verfahren wurde lediglich das Funktionsprinzip nachgewiesen, ohne dass schritthaltende Auswertungen oder Versuchsfahrten in größerem Umfang vorgenommen worden wären.

Dagegen zeigte die schritthaltende Kombination aus TCS, Laserscanner und/oder Video in Verbindung mit Landmarken *Map-Matching* mit hochpräzisen digitalen Karten (im Folgenden als TCS/LM³ Ansatz bezeichnet) einen deutlich höheren Reifegrad. Dem TCS kommt dabei die Funktion einer Groblokalisierung zu (mit einer gegenüber Standard-GNSS Lösungen deutlich höheren Verfügbarkeit), die es erlaubt, die mit Sensoren beobachteten Landmarken mit denjenigen der digitalen Karte korrekt zu assoziieren (Landmarken *Map-Matching*). Im Überlandverkehr wurde dies in längeren Versuchsfahrten mit Erfolg experimentell bestätigt. Im Stadtverkehr konnten lediglich umgebungslokale TCM/LM³ Versuche (ohne Beteiligung von Videodaten) der im Projekt ausgerüsteten Aschaffener Versuchskreuzung durchgeführt werden (s.u.).

Aufgrund der in städtischen Umfeldern stark eingeschränkten Sichtbarkeit von Satelliten, einer im Vergleich zu Laserscannern deutlich höheren lateralen Auflösung und insbesondere dank eines größeren vertikalen Sichtfeldes von Videokameras wäre eine Weiterentwicklung des TCS/LM³ Ansatzes von großem Interesse gewesen (Integration odometrischer Daten, Erweiterung der Bildfolgenauswertung zur Landmarkenfindung in städtischen Umfeldern). Einer dazu erforderlichen maßvollen Aufstockung des Fördervolumens zur Erarbeitung entsprechenden Erweiterungen wurde bedauerlicherweise nicht zugestimmt.

Die permanente Verfügbarkeit einer für die präventive Sicherheit hinreichend präzisen Eigenlokalisierung in städtischen Umfeldern bleibt damit insgesamt ein weiterhin offenes Problem.

- **Kreuzungsperzeption:** Neben zweier in Ulm und Alzenau gelegener Testkreuzungen, die in der Anfangsphase des Projekts vorwiegend zu algorithmischen Entwicklungen verwendet wurden, konzentrierten sich die Tests und Demonstrationen der Fahrzeug-Sicherheitsfunktionen im Kreuzungsverkehr vorwiegend auf die öffentliche Versuchskreuzung in Aschaffenburg. Dort wurde ein Sensornetzwerk aus Laserscannern und Videokameras (VHD und VGA Formate) installiert, welches den Verkehrsfluss in drei der vier Kreuzungsarme sowie die beiden Fußgängerüberwege einer Kreuzungsecke lückenlos erfasste. Weiterhin wurde die Kreuzung mit einer Funkeinheit und einem Paar Ko-TAG Transponder, wahlweise 1. oder 2. Generation, ausgestattet. Die Sensordaten wurden per LAN dem in einem Kontrollraum befindlichen Kreuzungs-Zentralrechner zugeführt, wo sie schritthaltend anonymisiert, verarbeitet und mittels Sensordaten- bzw. Informationsfusion zu einer dynamischen Gesamtre-

präsentation der aktuellen Szene zusammengeführt wurden. Für die Fahrbahn- und Fahrstreifenzuordnung der beobachteten Objekte ebenfalls erforderlich war eine hochgenaue digitale Karte der Kreuzung und die für die korrekte Objektpositionierung erforderliche Kalibrierung des Sensornetzwerks.

Die Funkeinheit der Kreuzung wurde insgesamt befähigt, folgende Nachrichten zu übermitteln: die Nachricht über die Anwesenheit, den Typ und den dynamischen Zustand aller beobachteten Verkehrsteilnehmer (per CPM) im 10Hz Takt, die Nachricht über den Status der Lichtsignalanlage, kurz LSA (per SPaT) mit 1 Hz und die Nachricht zur Kreuzungsgeometrie und -topologie ebenfalls mit 1 Hz.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass das auf dem Sensornetzwerk der Kreuzung basierenden Perzeptionssystem sehr wohl in der Lage ist die im Kreuzungsbereich befindlichen Fahrzeuge mittels drahtloser Kommunikation mit einer schritthaltenden Repräsentation der Kreuzungsumfeldes zu versorgen. Damit werden sogar Fahrzeuge, die lediglich mit einer Kommunikationseinheit, nicht aber eigener vorausschauender Sensorik ausgestattet sind, an der kooperativen Sicherheit beteiligt.

- **Fahrzeuglokale Perzeption:** Die fahrzeuglokale Perzeption ist seit mittlerweile mehreren Jahrzehnten die Grundlage für die auf vorausschauender Sensorik basierten Funktionen der Fahrerassistenz und Aktiven Sicherheit. Im Rahmen des Ko-PER Projektes lag der entsprechende Forschungsschwerpunkt in der Beherrschung außerordentlich heterogener Sensorausstattungen und damit ebenso heterogener Perzeptionsleistungen der diversen beteiligten Fahrzeuge. Hierzu waren partnerübergreifende Abstimmungen zu den eingesetzten Testmethoden sowie gemeinschaftlich durchzuführende Testfahrten erforderlich. Als wesentliches Ergebnis festzuhalten sind hier die partnerübergreifend erarbeiteten Anforderungen an die Art und Genauigkeit der Perzeptionsergebnisse, das dabei entwickelte gemeinsame Verständnis der bei kooperativen Ansätzen zu beachtenden Besonderheiten, sowie die eigentliche Durchführung der Tests, bei der nicht zuletzt der Konsens über die zielführend anzuwendende Methodik wesentlich vertieft wurde. Die erzielten Resultate wurden in umfangreichen (mehr als 100-seitigen) projektinternen Ergebnisdokumenten festgehalten.

1.5 Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten

Es ist in erster Linie die Aufgabe der Einzelberichte und weniger die des partnerübergreifenden Schlussberichts, Aussagen zu Verwertbarkeit und Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse zu treffen. Dennoch sei auf einige im Zusammenhang erwähnenswerte allgemeinere Aspekte hingewiesen.

Für das Teilgebiet der Mensch-Maschine-Interaktion wurde ein neuer, bisher kaum beachteter Ansatz der so genannten *Advisory Warnings* untersucht. Dieser Ansatz gestattet es, in sehr komplexen Verkehrsumfeldern, deren relativer Beitrag zum Unfallgeschehen einerseits kontinuierlich wächst, der sich aber andererseits einer Automatisierung noch längerfristig entziehen dürfte, unter Einbeziehung des Fahrers signifikant zur zeitgerechten (präventiven) Entschärfung potenzieller Gefahrensituationen beizutragen.

Die Entwicklung des skizzierten Ansatzes ist nicht zuletzt aufgrund folgender Sachverhalte interessant: Zum einen stellt er eines der seltenen Beispiele dar, bei denen die Entwicklung der MMI Konzepte einen wesentlichen, ja ursächlichen Beitrag zur Systementwicklung leistete und eben *nicht im Nachgang* auf eine bereits vorhandene technischen Funktion aufgesetzt wurde. – Für die Entwicklung der technischen Systeme war dies von großem Vorteil, insofern nämlich, als sich aufgrund der Ergebnisse der empirischen Untersuchungen der MMI Konzepte eine deutliche Reduktion der zunächst vermuteten deutlich höheren Leistungsanforderungen an die technischen System ergab: Es zeigte sich nämlich, dass nicht nur die Spezifität der *Advisory Warnings* von eher untergeordneter Bedeutung ist sondern, darüber hinaus,

dass die Fahrer sogar Falschwarnungen tolerieren, sofern diese nicht allzu häufig auftreten – stets unter der Voraussetzung dass die Gefahrenhinweise hinreichend früh erfolgen. (Für die bisher üblichen Warnungen mit Alarmcharakter trifft dies gerade nicht zu.) – Der Ansatz des *Advisory Warning* bildet insgesamt eine ideale Ergänzung zum bisher üblichen autonomen Noteingriff, der vorwiegend in einfachen Gefahrensituationen (beispielsweise Auffahren) angemessen ist. Aus Gründen der Produkthaftpflicht (Stichwort: Wiener Konvention) wird dieser erst dann ausgelöst, wenn das Reaktionsvermögen des Fahrers nicht mehr ausreicht, einen drohenden Unfall zu vermeiden. In komplexen Situationen hat diese Vorgehensweise aber den Nachteil, dass geeignete Maßnahmen zur Entschärfung der sich entwickelnden Gefahrensituation möglicherweise bereits verstrichen sind und dass Noteingriffe stets auch das Risiko der Gefährdung Dritter mit sich bringen.

Der optimale Zeitpunkt für das *Advisory Warning* liegt ca. 2s vor der letztmöglichen Maßnahme zur Abwendung eines drohenden Unfalls. Um diese Zeitschranke im Einzelfall zu bestimmen bedarf es geeigneter Softwaremodule zum Situationsverstehen. Die in AKTIV begonnene Entwicklung der Module zur Situationsanalyse und Verkehrsteilnehmer-Absichtserkennung wurde in Ko-PER konsequent weiterentwickelt und systematisch mit den MMI-Modulen verknüpft. Rechnerbasiertes Situationsverstehen dürfte eine der großen Herausforderungen künftiger Entwicklungen im Bereich der Fahrerassistenz und Präventiven Sicherheit darstellen, zum einen zur Beherrschung zunehmend komplexer Fahrumfelder und zum anderen insbesondere auch in Hinblick auf die angestrebte Höherautomatisierung des straßengebundenen Verkehrs.

Zur zunehmenden Bedeutung des Unfallschwerpunkts Kreuzungsverkehr ist anzumerken, dass trotz des vorhandenen Wissens um den Bau verkehrssicherer Kreuzungen entsprechende Maßnahmen aus Kostengründen, in Innenstädten auch aufgrund des nicht erfüllbaren Platzbedarfs, nicht immer möglich sind. Mit Ko-PER wurde aber gezeigt, dass eine Verbesserung der Kreuzungssicherheit sehr wohl auch ohne straßenbauliche Maßnahmen erzielt werden kann. Im Zusammenhang sei erwähnt, dass die sicherheitsverbessernde Wirksamkeit einer mit Sensornetzwerk und Kommunikationseinheit ausgestatteten Kreuzung keine quadratische sondern eine lineare Abhängigkeit von der Fahrzeugausstattungsrate mit Kommunikationseinheiten hat, und dass das partizipierende Fahrzeug nicht unbedingt mit eigener vorausschauender Sensorik ausgestattet zu sein braucht. Die Verfügbarkeit perzeptierender Kreuzungen kann daher auch einen Beitrag dazu leisten, die Markteinführung der Fahrzeugkommunikation zu fördern.

Die im Rahmen von Ko-PER entwickelte Repräsentation hochgenauer digitaler Karten mittels Kreisbogen-*Splines* erlaubt eine besonders Speicherplatz sparende Darstellung à priori vorgegebener Präzision; dies ist insbesondere auch unter den Aspekten Effizienz, Ökonomie und Ökologie des Straßenverkehrs von Interesse.

Die in Ko-PER definierten neuen Nachrichtentypen integrieren erstmals Information über die Dynamik des Fahrumfeldes mit fahrzeuglokalen Zustandsgrößen. Insbesondere werden „Objektabsichten“, d.h. unmittelbar bevorstehende Änderungen der Dynamik des Objektzustands, frühzeitig kommuniziert. Weiterhin führt die Kommunikation wahrgenommener Umfeld-Information in Verbindung mit der präzisen Eigenlokalisierung und den hochgenauen digitalen Karten *de facto* zu einer Erhöhung der sensorischen Reichweite. Beides ist unter anderem in Hinblick auf künftig automatisch gelenkte Fahrzeuge von Interesse.

2 Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung, Projektstruktur

Die zunehmende Marktdurchdringung von Systemen der aktiven und präventiven Fahrzeugsicherheit wie etwa ESP, ACC und EBA bewirkt eine deutliche Reduktion der Unfälle bzw. Unfallschwere in den zugeordneten Typklassen der Allein- beziehungsweise Auffahrunfälle, also in Verkehrssituationen vergleichsweise geringer Komplexität. In der Folge nimmt die relative Häufigkeit von Unfällen in komplexeren Situationen stetig zu. Sowohl im Folge- als auch im Kreuzungsverkehr betrifft dies Szenarien, bei denen Verdeckungen, Nichteinsehbarkeit und unerwartetes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer eine wichtige Rolle spielen. Der Anteil der Kreuzungsunfälle mit Personenschäden in Deutschland, beispielsweise, betrug in 2012 insgesamt bereits 37%, innerorts sogar 42% (vgl. Abbildung 1). Diese Zahlen beziehen sich nur auf die Unfalltypen Abbiegen, Einbiegen und Kreuzen. Rechnet man die an Kreuzungen geschehenen Längsverkehr- und Fußgängerunfälle (Auffahren bzw. Fahrbahn-Überschreiten) hinzu, so liegen die genannten Prozentanteile sogar noch höher.

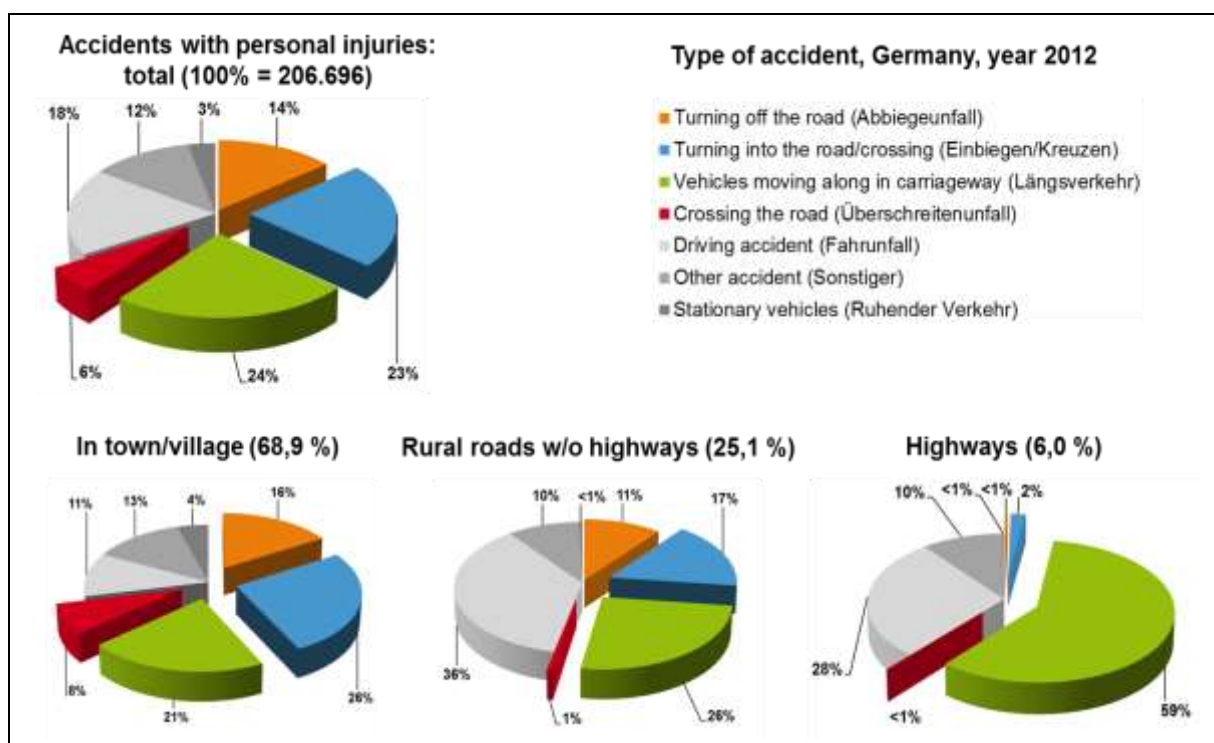


Abbildung 1: Unfälle mit Personenschäden (Deutschland, 2012): Hauptkategorien und Häufigkeiten

Die Unfallträchtigkeit gerade des Kreuzungsverkehrs dürfte u.a. zurückzuführen sein auf:

- die partielle Überforderung des Wahrnehmungsvermögens des Fahrers aufgrund der eigentlich erforderlichen Rundumsicht
- die hohe Komplexität des sich dort abspielenden Verkehrsgeschehens und eine daraus resultierende partielle kognitive Überbeanspruchung des Fahrers
- die Nichteinsehbarkeit kreuzender Fahrbahnabschnitte sowie fahrzeugbedingte Verdeckungen, außerdem
- Fehleinschätzungen sowie unerwartetes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer.

Die genannten Ursachen für das Zustandekommen kritischer Situationen und potenzieller Unfälle sind sinngemäß auch in komplexen Längsverkehrsszenarien wirksam, wobei hierbei Unaufmerksamkeit und Ermüdung möglicherweise einen höheren Stellenwert einnehmen.

Die Grundmotivation des Projekts Ko-PER ist die Verbesserung der präventiven (d.h. zeitlich vorausschauenden) Verkehrssicherheit in komplexen Verkehrssituationen. Das Projekt zielt dabei hauptsächlich auf die Untersuchung und Beantwortung der Frage, inwieweit sich das Gefahrenpotenzial komplexerer Szenarien durch kooperative Perzeption, d.h. durch die Integration der sensorischen Wahrnehmungen mehrerer benachbarter Fahrzeuge und – kreuzungslokal – auch der Ergebnisse infrastrukturegebundener Sensornetzwerke, verringern lässt.

Hierzu werden lokale Perzeptionsergebnisse drahtlos kommuniziert und in den jeweiligen Empfängerfahrzeugen zu einem dynamischen Gesamtbild fusioniert, das im Anschluss dazu genutzt wird, die aktuell vorliegende Verkehrssituation und die damit einhergehenden Risiken mittels Informationsverarbeitung schritthaltend zu analysieren.

Die kooperative Perzeption² bietet gegenüber der fahrzeuglokalen Umfeld-Erfassung u.a. folgende Vorteile:

- Verwirklichung einer virtuellen Rundumsicht und damit Ergänzung fahrzeuglokal nicht erfasster Bereiche (weder durch Sensoren abgedeckt oder/und vom Fahrer übersehen):
- Erweiterung des Wahrnehmungsbereichs um lokal nichteinsehbare Gebiete: Aufhebung von Verdeckungen aufgrund stationärer und nichtstationärer Objekte (wie etwa Kreuzungsbebauung oder LKW):
- Erweiterung der Distanz des Wahrnehmungsbereichs mittels entfernter (aber im Bereich der Funkreichweiten liegender) Perzeptionseinheiten.

Auf Basis der auf diese Weise erweiterten Wahrnehmung lassen sich, wie im Fortgang des Projekts gezeigt wurde, mittels einer geeigneten Aufbereitung der verfügbaren Information vergleichsweise frühzeitige Risikoabschätzungen durchführen. Eine entsprechend zeitgerechte Information des Fahrers (im Sinne eines *Advisory Warnings* – der optimale Zeitpunkt liegt ca. 2s vor dem letztmöglichen Eingriff zur Vermeidung eines Unfalls), ermöglicht es den Fahrern, die Kritikalität gefährlicher Situationen in der überwiegenden Zahl der Fälle durch moderates eigenes Handeln zu entschärfen. Dies macht systemautonome Fahrzeuingriffe in allerletzter Sekunde weitgehend obsolet – ein Sachverhalt der die in komplexen Szenarien schwer überschaubaren Konsequenzen später Notfall-Eingriffe grundsätzlich vermeidet.

Zur Verwirklichung des skizzierten Ansatzes werden die jeweils lokal gewonnenen Perzeptionsergebnisse drahtlos kommuniziert und in den benachbarten Empfängerfahrzeugen jeweils zu einem dynamischen Gesamtbild fusioniert, um im Anschluss die aktuell vorliegende Verkehrssituation und das ihr ggf. innewohnende Risikopotenzial IT-basiert auszuwerten.

Abbildung 2 zeigt die für diesen Ansatz erforderlichen Bausteine, wobei die Basis der Pyramide die sensornahen und deren Spitze den sensorfernen Schichten der Informationsverarbeitungskette entspricht.

² Der Begriff Perzeption wird hier und im Folgenden gleichbedeutend mit den Termini (sensorische) Wahrnehmung und Fahrumgebungserfassung verwendet



Abbildung 2: Schichtung der Ko-PER Informationsverarbeitungsmodulen; in der Nähe der Basis der gedachten Pyramide sind sensornähe, im Bereich der Spitze dagegen sensorferne Verarbeitungsschritte angesiedelt.

Die in Abbildung 2 skizzierte Schichtung der Ko-PER Informationsverarbeitung gibt simultan die Struktur des Projekts wieder. Jeder gezeigten Verarbeitungsschicht entsprechen ein oder mehrere Hauptaufgabenpakete im Projekt, die in der folgenden Aufzählung skizziert werden:

- Zur Kreuzungsperzeption (vgl. Abschnitt 3.3) zählen zum einen die Auswahl, Konfiguration, Installation und Verkabelung der Kreuzungs-Hardware (Sensoren, Netzwerk und Rechner), sowie deren Anbindung an die „Außenwelt“ (Kommunikations- und Ko-TAG Lokalisierungshardware, Signalanlagenstatus), zum anderen die Software zur Sensor-Kalibrierung und Sensordatenverarbeitung; die damit gewonnenen Perzeptionsergebnisse des Kreuzungs-Sensornetzwerks werden zur drahtlosen Übertragung an die Kommunikationshardware übergeben.
- Die fahrzeuglokalen Perzeption (siehe Abschnitt 3.1) umfasst entsprechend die Ausstattung der Fahrzeug-Versuchsträger mit Sensoren und Messtechnik, die IT-Systeme zur Sensordatenauswertung und Bereitstellung der Ergebnisse der fahrzeuglokalen Umfeld-Erfassung sowie deren Anbindung an Kommunikationseinheiten, Lokalisierungs- und Referenzsysteme.
- Eine Sonderstellung nimmt die fahrzeugbasierte Eigenlokalisierung ein. Eine grundlegende Voraussetzung für die korrekte Assoziation (und damit Fusionierung) der Wahrnehmungen von Kreuzungen und anderen Fahrzeugen mit den eigenen Beobachtungen ist eine zuverlässige, vergleichsweise präzise Eigenlokalisierung (Position, Orientierung und Zeit). Die spezifizierten Genauigkeitsanforderungen von maximal einer halben Fahrstreifenbreite bzw. Fahrzeuglänge sowie weniger als 1° stellen eine erhebliche Herausforderung dar. Daher wurde in Ko-PER das Potenzial unterschied-

licher Ansätze untersucht, deren Methodik und Ergebnisse in Abschnitt 3.2 im Einzelnen beschrieben werden.

- Abschnitt 3.4 befasst sich mit der in Ko-PER eingesetzten Kommunikationsmodule, insbesondere der Spezifikation, Implementierung und Anwendung einer Anzahl neu geschaffener Nachrichtentypen zur Übermittlung der Perzeptionsergebnisse einzelner lokaler Sensornetzwerke (Fahrzeuge oder Kreuzung mittels sim^{TD} Kommunikationshardware).
- Im Anschluss beschreibt Abschnitt 3.5 die übergreifende Sensordatenfusion, d.h. die Integration eigener Beobachtungen mit den Ergebnissen drahtlos empfangener Fahrzeugumfeld-Information benachbarter Fahrzeuge oder Kreuzungen.
- Die fusionierten fahrzeugübergreifenden Wahrnehmungsergebnisse werden dem Verarbeitungsmodul *Situationsanalyse* (Abschnitt 3.6) zugeführt, in dem aus der verfügbaren Gesamtsicht des lokalen Verkehrsumfelds sowie einer Schätzung der Fahrerabsicht mittels Trajektorien-Prädiktion Kritikalitätsmaße abgeleitet werden.
- Letztere dienen wiederum zur Erzeugung der bereits oben erwähnten „*Advisory Warnings*“ in den betroffenen Fahrzeugen. Die den schlussendlich verwendeten Ausprägungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu Grunde liegenden Konzepte basieren auf außerordentlich umfangreichen empirischen Untersuchungen der im Zusammenhang relevanten Sachverhalte, vgl. hierzu Abschnitt 3.7.
- In Abschnitt 3.8 werden schließlich die verschiedenen in Ko-PER Fahrzeugen realisierten Funktionen der präventiven Sicherheit beschrieben und die Ergebnisse ihrer Erprobung diskutiert.

Kapitel 4 fasst die wichtigsten Ereignisse und Ergebnisse zusammen, nämlich die Ko-PER Beiträge zu nationalen und internationalen Workshops und Konferenzen (siehe hierzu auch die Liste der mehr als 50 Ko-PER Publikationen in Anhang A), zum Ko-FAS Partnerkreistreffen in 2010 sowie zur Ko-FAS Zwischen- und Abschlusspräsentation in 2011 und 2013. Darüber hinaus findet man am Ende dieses Kapitels eine Liste der ab Anfang 2012 bei den vierteljährlichen Plenumstreffen abgehaltenen eingeladenen Gastvorträge sowie ein Nachweis der partnerübergreifend durchgeführten Mess- und Testkampagnen (Fahrzeuge und Kreuzungen).

Kapitel 5 beschreibt den Austausch mit anderen BMWi Förderprojekten, nämlich mit sim^{TD}, Ko-TAG und Ko-KOMP sowie informellen Kontakte zu weiteren Fördervorhaben. Letztere erfolgten teilweise auch im Zuge der Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung, die in Kapitel 6 und Anhang A zusammenfassend beschrieben sind.

Eine Kurzfassung dieses Berichts sowie eine zusammenfassende Bewertung der im Rahmen von Ko-PER erzielten Ergebnisse finden sich auf den Seiten 3 bis 8, oben. Die dort gegebene Darstellung entspricht der Sicht des Projektsprechers, der das Projekt nicht nur koordinierend begleitete, sondern auch das Konzept und die Struktur des Vorhabens ursprünglich erarbeitete.

3 AP: Herausforderungen, untersuchte Methoden, Ergebnisse

3.1 Fahrzeuglokale Perzeption (AP 2.400 und 2.500)

3.1.1 Fahrzeugausstattung und Spezifikation (AP 2.400)

Die fahrzeuglokale Perzeption bildet eine der Grundlagen für die Umsetzung kooperativer Assistenzfunktionen bzw. einer kooperativen Perzeption. Kooperative Assistenzfunktionen erfordern unter anderem die Berücksichtigung des heterogenen Ausstattungsgrades der beteiligten Fahrzeuge. Insbesondere Umfang und Leistungsfähigkeit der integrierten Sensorik zur Umfelderkennung, die Ausstattung zur spurengenauen Fahrzeug-Eigenlokalisierung und die Kommunikationshardware als Grundlage zum Austausch von Perzeptionsdaten sind von Bedeutung.

Die Zielsetzungen und Herausforderungen in Bezug auf die Fahrzeughardwareausstattung und Spezifikation waren:

- der Aufbau einer heterogenen Versuchsflotte zur experimentellen Abschätzung des erzielbaren Sicherheitsgewinns durch kooperative Perzeption und fahrzeugübergreifende Sensordatenfusion,
- die Spezifikation der Fahrzeugsensoren und die Herleitung der mit der gewählten Sensorkonfiguration realisierbaren Kreuzungs- und Längsverkehrsszenarien,
- die Hardware für eine zeitsynchrone Datenverarbeitung und -aufzeichnung in *ad hoc* verteilten Sensornetzwerken und eine Ergebniskommunikation mit kurzer Latenzzeit.
- die Integration von Hardwaresystemen zur Fahrzeug-Eigenlokalisierung und
- die Ansteuerung von Aktuatoren inkl. Anzeigegeräten.

3.1.1.1 Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des Ko-PER Projektes wurde eine umfangreiche Spezifikation der Systemanforderungen erarbeitet. Die Spezifikationen für die fahrzeuglokale Perzeption und Sensordatenfusion wurden für die Anwendungsbereiche Längsverkehr sowie für das Kreuzungsumfeld, unter Berücksichtigung relevanter GIDAS-Unfalltypen (*German In-Depth Accident Study*), festgelegt. Insbesondere konnten für die relevanten Unfalltypen die Eigenschaften der zu erreichenden Genauigkeiten, maximale Latenzzeiten sowie die zu berechnenden Konfidenzmaße und Synchronisationsmechanismen (Zeitstempel) spezifiziert werden.

Die heterogene Sensorkonfiguration der Versuchsträger wurde nach qualitativen Sensormerkmalen charakterisiert, wie z.B. aktiv/passiv, Entfernungsbereich, Winkelauflösung und Wiederholrate.

Aufbauend auf der Sensorcharakterisierung und den entwickelten Genauigkeitsanforderungen bzgl. der relevanten Szenarien konnten die realisierbaren Kreuzungs- und Folgefahrtszenarien für die einzelnen Versuchsträger identifiziert werden.

3.1.1.2 Erzielte Ergebnisse

Für eine Abschätzung des erzielbaren Sicherheitsgewinns durch die Ko-PER Assistenz wurde eine heterogene Versuchsflotte aufgebaut, der sowohl Fahrzeuge mit ausschließlich vorausschauender Sensorik als auch Fahrzeuge mit einer 360° Umfelderkennung angehören. Die verbaute Sensorik umfasst Radar- und Lidar-Sensoren für den Fern- und Nahbereich sowie Kamera-basierte Systeme.

Die Sensorerfassungsbereiche der implementierten Versuchsträger der Partner BMW, Daimler, Delphi, driveU und CSEI sind in Abbildung 3 dargestellt.

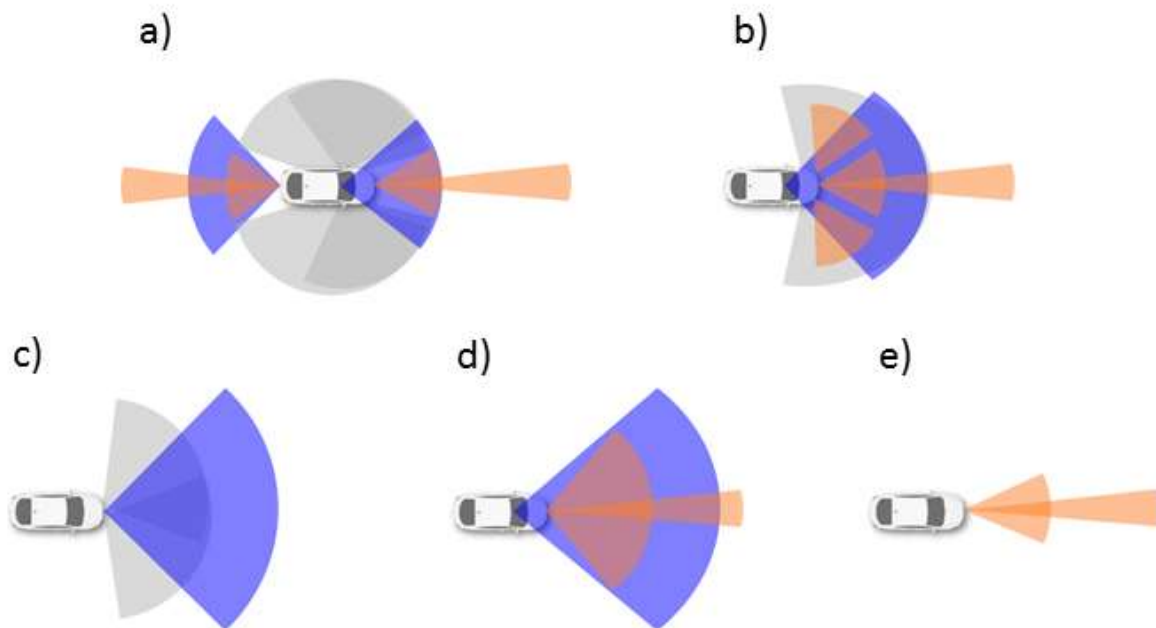


Abbildung 3: Sensorerfassungsbereiche der Ko-PER Versuchsträger, orange: Radar, blau: Kamera, grau: Laserscanner; im Einzelnen dargestellt: a) BMW, b) Daimler, c) driveU, d) Delphi, e) CSEI³

Die globale Zeitsynchronisierung der Sensordaten wurde von den meisten Fahrzeugbetreibern über eine sogenannte SyncBox realisiert, die eine UTC Zeitbasis mit einer maximalen Abweichung von unter einer Millisekunde bereitstellt. Die Synchronisierung der SyncBox Uhr mit UTC erfolgt über das PPS (Pulse per Second) Signal und die NMEA (National Marine Electronics Association) Nachricht eines GPS-Empfängers. Auf Grundlage dieser Zeitbasis ermöglicht die SyncBox sowohl die Zeitstempelung von CAN Signalen sowie von lokal generierten Pulsen zur Triggerung der schnapsschussartigen Datenerfassung von Sensoren.

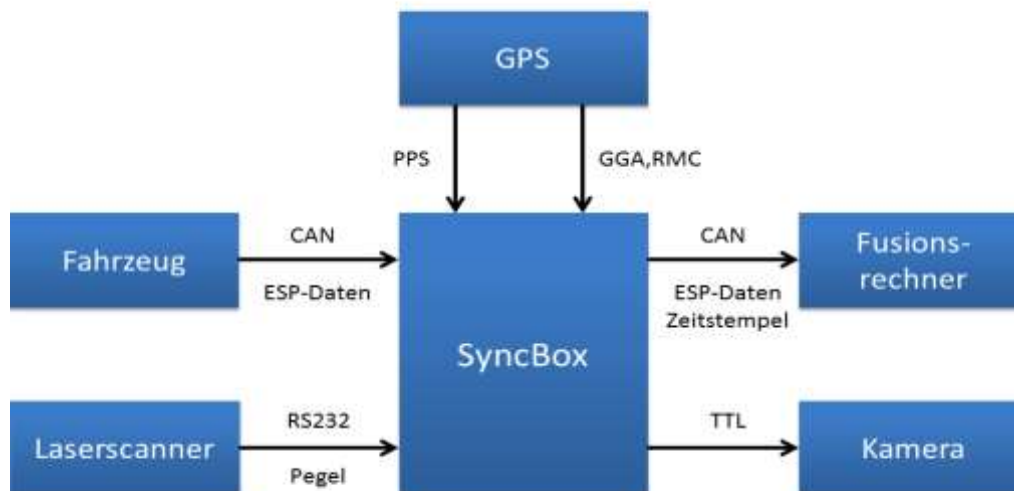


Abbildung 4: Einsatzbeispiel der SyncBox zur Zeitstempelung von CAN Nachrichten sowie der Triggerung von Schnapsschüssen zur Sensordatenerfassung

³ Der CSEI Versuchsträger war zwar mit einem vorausschauenden Radarsystem ausgestattet, dieses wurde aber für die von CSEI dargestellte Funktion, die ausschließlich auf Ergebnissen der Perception und Fußgänger-Absichtsprädiktion der Aschaffenburger Versuchskreuzung basierte, nicht genutzt.

Ein Anwendungsbeispiel zur Zeitstempelung von CAN Nachrichten und der Triggerung von Sensoren ist in Abbildung 4 dargestellt. Erreicht eine CAN-Nachricht mit einer spezifizierten ID die SyncBox, so wird eine Zeitstempelnachricht erzeugt und via CAN an den Fusionsrechner versandt. Die auslösende Nachricht wird ebenfalls an den Fahrzeugrechner weitergeleitet (Gateway). Die Triggerung von Sensoren, wie Kamera oder Laserscanner, erfolgt über einen Puls mit TTL-Pegel.

Mit Hilfe der lokalen Sensorik werden sowohl von den Fahrzeugen als auch von den Kreuzungen Messdaten erfasst. Um diese für die fahrzeugübergreifende Fusion nutzen zu können, ist ein Bezug des jeweiligen Messzeitpunktes eines Sensordatums zur globalen Zeitbasis UTC herzustellen. Der Messzeitpunkt bezeichnet dabei den Zeitpunkt der Datenerfassung im Sensor. Anschließend stehen die Daten erst nach der sensorinternen Verarbeitung und Übertragung zum Fahrzeug- bzw. Kreuzungsrechner zur Verfügung. Ein Großteil (aber nicht alle) der in Ko-PER verwendeten Sensoren sind entweder extern triggerbar, d.h. der Messzeitpunkt lässt sich durch ein digitales Signal an einem Eingang des Sensors von außen vorgeben, oder stellen den Zeitpunkt der Messdatenaufnahme durch ein digitales Trigger-Signal an einem entsprechenden Ausgang extern zur Verfügung. Durch die Anbindung dieser digitalen Ein- bzw. Ausgänge an die SyncBox werden Zeitstempel zu den jeweiligen Messzeitpunkten erzeugt und an den Fahrzeugrechner übermittelt. In einem weiteren Schritt ist es erforderlich, im Fahrzeugrechner die über CAN eingehenden Zeitstempel der SyncBox mit den zeitlich versetzt ankommenden Sensordaten zu assoziieren.



Abbildung 5: Die Steckerbuchsen für die HF-Schnittstellen auf der Vorderseite der CCU.

Mit einer Ausnahme waren alle Ko-PER Versuchsfahrzeuge mit einer Positionierungshardware basierend auf einem *Tightly Coupled GNSS System (TCS)* ausgestattet; dieses kostengünstige System bietet in Kombination mit weiteren Ansätzen die Basis für eine fahrspurgenaue Lokalisierung – vgl. Abschnitt 3.2.



Abbildung 6: Beispiel-Dachträger für das RTK und TCS Positionierungssystem.

Zusätzlich zu dem TCS System wurde jeweils ein Referenzsystem zur Bewertung der Ko-PER Lokalisierungsansätze eingesetzt. Die Referenzsysteme (*High-End* RTK zur Erfassung der Echtzeitkinematik und Stützung eines GNSS) liefern Genauigkeiten im Zentimeterbereich – hinreichenden Satellitenempfang vorausgesetzt. In Abbildung 6 ist das Beispiel eines Dachträgers mit den Antennen der Positionierungssysteme dargestellt.

Neben der heterogenen Ausstattung mit Sensoren zur Umfeld Erfassung (vgl. Abbildung 3) wurden die Ko-PER Versuchsfahrzeuge entsprechend der Tabelle 1 gemäß dem jeweils realisierten Systemansatz kategorisiert. Fahrzeuge vom Typ A sind nicht nur mit eigener Umfeld-Sensorik ausgestattet (kommunizieren also lokale Perzeptionsergebnisse an andere) sondern besitzen außerdem Funktionen, die auf kooperativer Perzeption beruhen. Fahrzeuge vom Typ B haben keine eigene Umfeld-Sensorik, sondern lediglich eine Kommunikations- und Lokalisierungseinheit, nutzen aber drahtlos empfangene Perzeptionsergebnisse anderer (Fahrzeuge und/oder Kreuzungen) zur Realisierung Ko-PER-spezifischer Fahrerassistenz- und Sicherheitsfunktionen. Man kann sich unter der Typ B Kategorie in Bezug auf spätere Produktrealisierungen bevorzugt Low-Cost Fahrzeuge vorstellen. – Fahrzeuge vom Typ C, schließlich, kommunizieren Perzeptions- und Eigenpositionsinformation, machen sich also für andere aktiv „sichtbar“, realisieren aber selbst keine eigenen Ko-PER Funktionen⁴.

Ausstattungskomponenten / Fahrzeugtyp	Typ A	Typ B	Typ C
Kommunikationseinrichtung	✓	✓	✓
Einrichtung zur Eigenlokalisierung	✓	✓	✓
fahrzeuglokale Perzeption & Fusion	✓	✗	✓
Fahrzeugübergreifende Informationsfusion	✓	✗	✗
Ko-PER spezifische Fahrzeugfunktion	✓	✓	✗

Tabelle 1: Einzelkomponenten der drei Ko-PER Fahrzeug-Kategorien

3.1.2 Fahrzeuglokale Perzeption samt Tests (AP 2.500)

Die fahrzeuglokale Perzeption dient der Erfassung statischer und dynamischer Objekten im Fahrzeugumfeld. Statische Objekte sind beispielsweise Fahrstreifenmarkierungen, Leitpfosten oder Randbebauungen, dynamische Objekte sind naturgemäß andere Verkehrsteilnehmer.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft auf, dass insbesondere bei der Annäherung und Überquerung einer Kreuzung eine Vielzahl statischer und dynamischer Objekte relevant ist und daher von der fahrzeuglokalen Perzeption erfasst werden müssen. (Verkehrszeichen und Lichtsignalköpfe sind dabei noch nicht einmal visualisiert). So ist es für das Fahrzeug A erforderlich, neben dem Fahrzeug C* und B auch die beiden Radfahrer G und F sowie die beiden Fußgänger D und E zu erfassen. Zusätzlich ist es erforderlich, die räumliche Zuordnung dieser Objekte zu den Fahrstreifen der Fahrbahnen vorzunehmen.

Nachfolgend werden die verwendeten Ansätze und Methoden zur fahrzeuglokalen Perzeption, sowie die erzielten Testergebnisse zusammengefasst.

⁴ Auch die Ko-PER Versuchskreuzungen gehören formal gesehen zur Kategorie C. In späteren Entwicklungsstufen ist es denkbar, dass die Kreuzungen auch kommunizierte Fahrzeuginformation (beispielsweise Typ, Größe, Geschwindigkeit etc.) integrieren, die fahrzeugeitig fallweise viel verlässlicher bereitgestellt werden kann. In diesem Falle würde von der Kreuzung auch eine „Station“-übergreifende Informations-Assoziation und -Fusion stattfinden.

Wie in Abbildung 3, auf Seite 25 dargestellt decken die verschiedenen Sensorsysteme der Ko-PER Versuchsträgers unterschiedliche Erfassungsbereiche ab. Eine der Herausforderung die sich dabei stellt ist, dass die Objektfusion aus unterschiedlichen Objekthypothesen der Sensorsysteme lokal gesamthaft gültige Objekthypothesen erzeugen muss. Als Ergebnis liegt eine konsistente lokale Darstellung des Umfelds vor, die dann im Rahmen der fahrzeugübergreifenden Sensordatenfusion mit den via V2V oder V2I bereitgestellten Objektlisten fusioniert wird. Jedem dynamischen Objekt dieser lokalen Umfeld-Darstellung ist neben einer WGS-84 Position auch ein Millisekunden-genauer globaler Zeitstempel zugeordnet.

3.1.2.2 Erzielte Ergebnisse / durchgeführte Tests

Im Rahmen von mehreren Messkampagnen – vgl. Tabelle 19 auf Seite 158 – wurden die fahrzeuglokalen Perceptionsergebnisse eines jeden Versuchsträgers analysiert. Das entsprechende Ergebnisdokument gibt auf über 150 Seiten eine zusammenfassende Darstellung der ausgewerteten Messdaten.

Schwerpunkte der durchgeführten Tests waren die Bewertung

1. der globalen Objektdaten-Zeitstempelung in der lokalen Umfeld-Repräsentation (UR).
2. der Genauigkeit der Lokalisierung der Objektdaten in der UR,
3. der Genauigkeit der Geschwindigkeit der Objektdaten in der UR sowie
4. der Konsistenz der für jedes Objekt angegebenen Lokalisierungs- und Geschwindigkeitsgenauigkeit.

Jeder der an der Messkampagne beteiligten Versuchsträger wurde mit einer GNSS-gestützten Inertial-Plattform ausgestattet. Diese wird als Referenzsystem verwendet und stellt eine zentimetergenaue Position des Versuchsträgers zur Verfügung. Die Genauigkeit des zugeordneten Zeitstempels liegt im einstelligen Millisekunden-Bereich.

Bei den Messfahrten wurden mit jedem Versuchsträger die Daten des Referenzsystems, die Daten der Ko-PER Lokalisierungssysteme, die Fahrzeugdaten des Versuchsträgers und die Ergebnisse der fahrzeuglokalen Perception (lokale Darstellung des Fahrumfeldes) simultan aufgezeichnet. Um für die unterschiedlichen Sensorkonfigurationen eine Vergleichsgrundlage zu schaffen, wurde das Fahrzeugumfeld in unterschiedliche Bereiche unterteilt – siehe Abbildung 9.

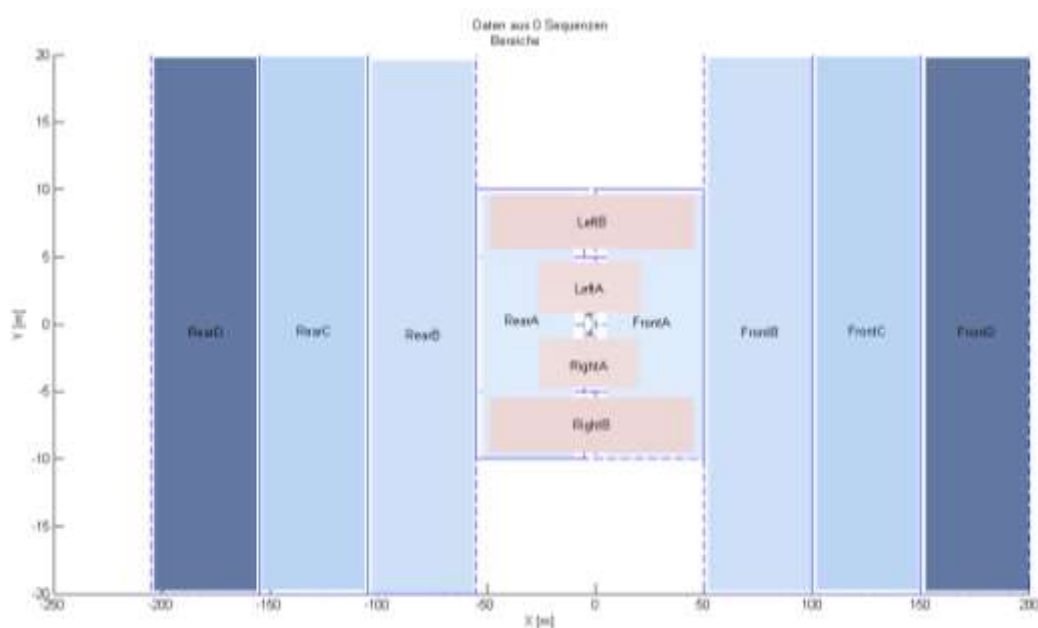


Abbildung 9: Unterteilung des Fahrzeugumfeldes in zwölf Felder: Front(A-D), Seiten(A-B) und Heckbereich(A-D) zur quantitativen Analyse der fahrzeuglokalen Perception.

Als Ergebnis zeigte sich, dass für die globalen Zeitstempel der Objekte der lokalen Umfeld-Darstellungen bei allen Versuchsfahrzeugen eine Genauigkeit von wenigstens 30 Millisekunden erzielt werden konnte.

Zusätzlich liegen für jeden Versuchsträger Schaubilder vor, mit welcher Genauigkeit die fahrzeuglokale Perzeption den Abstand zu einem anderen Versuchsträger sowie dessen Geschwindigkeit bestimmt. Diese Schaubilder enthalten Histogramme über die longitudinalen bzw. lateralen Abweichungen der Position, d.h. in X- (Abbildung 10) bzw. Y-Richtung (Abbildung 11).

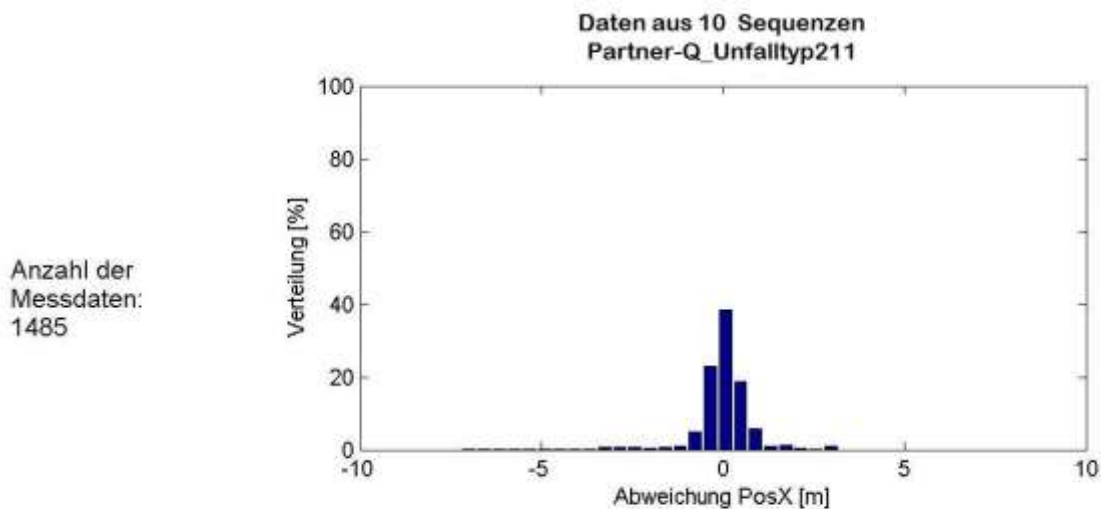


Abbildung 10: Histogramm über Abweichungen der Position in X-Richtung

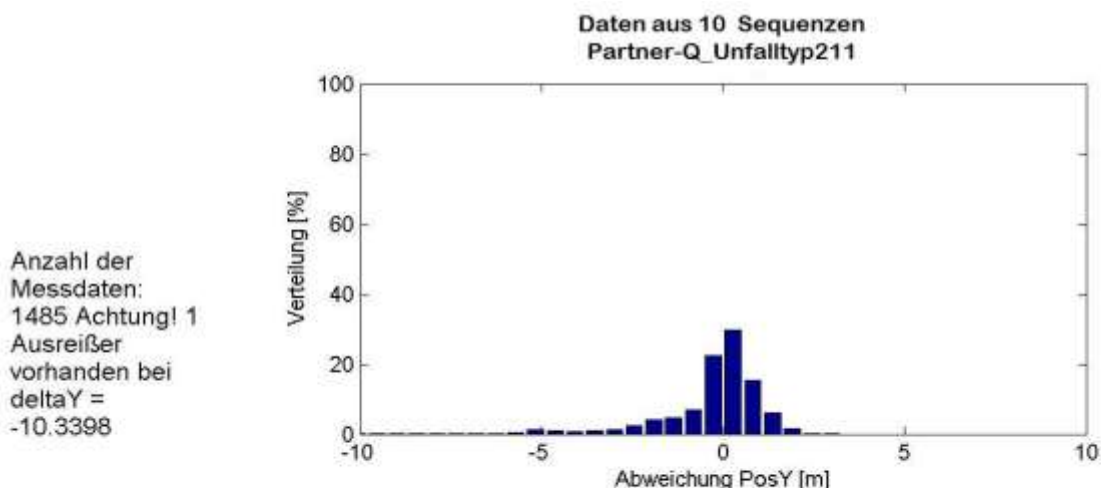


Abbildung 11: Histogramm über Abweichungen der Position in Y-Richtung

Darüber hinaus wird untersucht und dokumentiert, wie wirklichkeitstreu ein Perzeptionssystem die Genauigkeit seiner Ergebnisse einschätzt. Als Gütemaß dient hierzu der so genannte *Normalized Estimation Error Squared* (NEES). Eine Beispielmessung ist in Abbildung 12 angegeben.

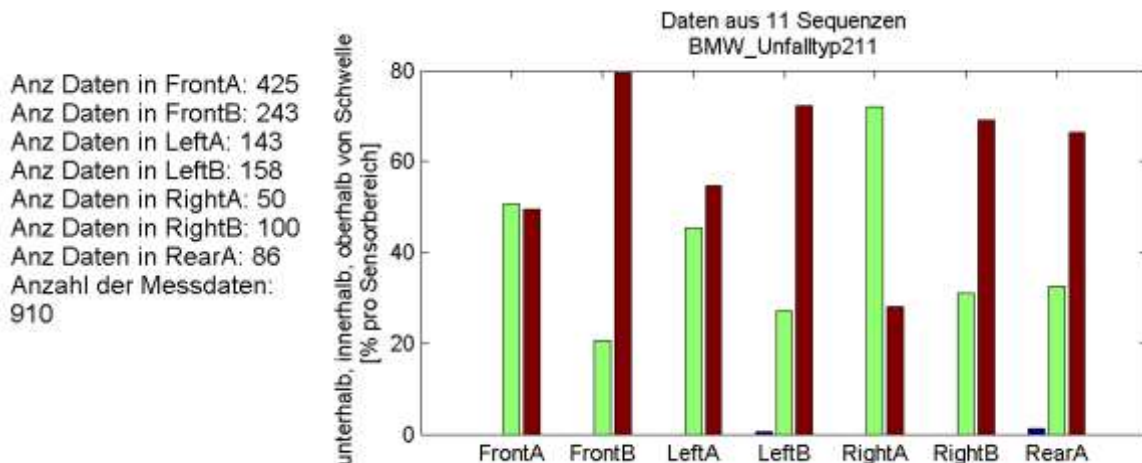


Abbildung 12: Anteil der innerhalb und außerhalb des 95% NEES Intervalls der Position

Liegt der NEES unter einer Schwelle t_{\min} , schätzt der Zustandsschätzer die Genauigkeit des wahrgenommenen Objekts schlechter ein, als sie tatsächlich ist (blauer Balken). Liegt der NEES über einer Schwelle t_{\max} , so schätzt der Zustandsschätzer die Genauigkeit besser ein, als sie tatsächlich ist (roter Balken). Liegt der NEES zwischen den beiden Schwellen so schätzt der Zustandsschätzer die Genauigkeit realistisch ein (grüner Balken). Im Rahmen der Auswertung wurden die Schwellen auf $t_{\min} \geq 2,5\%$ und $t_{\max} \leq 97,5\%$ gesetzt und damit ein 95% Intervall eingeschlossen.

Diese und weitere Ergebnisse wurden – wie bereits erwähnt – in einem umfangreichen projektinternen Dokument zusammengefasst und dienten als Ausgangs- und Referenzinformation für die fahrzeugübergreifende Sensordatenfusion.

3.2 Fahrzeugeigenlokalisierung (AP 2.600)

3.2.1 Aufgabenstellung, Anforderungen und Zielsetzungen

Die Fahrzeugeigenlokalisierung beschreibt die Positionierung eines Fahrzeugs mit bordeigenen Sensoren in einem übergeordneten georeferenzierten Koordinatensystem. Eine hinreichende Genauigkeit der Eigenlokalisierung ist für viele Anwendungen im Zusammenhang mit der Fusion von Daten aus verschiedenen Quellen von zentraler Bedeutung, weshalb diesem Thema im Rahmen von Ko-PER ein besonderer Stellenwert zukam.

Eine fahrzeugübergreifende Fusion der Information verschiedener Umfeld-Erfassungssysteme kann nur mit hinreichend genauer Kenntnis der eigenen und fremden Fahrzeugposition und -orientierung erfolgen. Für die entsprechende Informationsfusion ist die korrekte Assoziation der mittels drahtloser Kommunikation übermittelten Information mit den Ergebnissen der fahrzeuglokalen Wahrnehmung des Eigenfahrzeugs unerlässlich. Dies sei an folgendem Beispiel beschrieben: Ein Fahrzeug A übermittelt Informationen zu seinem aktuellen dynamischen Zustand und seiner lokalen Fahrumgebung. Fahrzeug B integriert diese Informationen in sein eigenes Fahrzeug-Umfeldmodell und kann entsprechend darauf reagieren. Leitet nun Fahrzeug A einen Bremsvorgang ein, ist die Bedeutung für Fahrzeug B vollkommen unterschiedlich, je nachdem ob sich Fahrzeug A in der gleichen Fahrspur, vor oder hinter Fahrzeug B oder in einem zu Fahrzeug B benachbarten Fahrstreifen befindet. Daraus folgt, dass die kommunizierenden Verkehrsteilnehmer über Lokalisierungsmöglichkeiten verfügen müssen, die in Querrichtung eine eindeutige Spurzuordnung und in Längsrichtung zumindest eine eindeutige Fahrzeug-Assoziation (Zuordnung) erlaubt. Dies gilt im Bereich von Kreuzungen und für den Folgeverkehr gleichermaßen. An Kreuzungen kommt jedoch eine verschärfte Anforderung an die Längsrichtungsgenauigkeit hinzu, die durch die korrekte Lokalisierung der Haltelinien bzw. durch die Änderung der Bedeutung von Längs- und Querrichtung beim Ab- und Einbiegen bedingt ist.

Um die notwendigen Anforderungen an die Fahrzeugeigenlokalisierung von den eingesetzten Sensoren zu entkoppeln, wurden erstere in einem Top-Down-Ansatz jeweils mit Blick auf spezifische Fahrerassistenz- und Sicherheitsfunktionen abgeleitet. Diese Vorgehensweise hat unter anderem den Vorteil, die Leistungsmerkmale einzelner Verfahren der Fahrzeugeigenlokalisierung in Bezug auf spezifische Assistenz- und/oder Sicherheitsfunktionen differenziert bewerten zu können.

Insbesondere wurde bei der Anforderungsanalyse zwischen Einsatzszenarien im Kreuzungs- und im Längsverkehr differenziert, da speziell die Kreuzungsanwendungen zum Teil deutlich anspruchsvollere Anforderungen stellen als diejenigen im Längsverkehr. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse zur Fahrzeug-Eigenlokalisierung sind in Tabelle 2 für Applikationen im Kreuzungsbereich und in Tabelle 3 für Applikationen im Längsverkehr zusammengefasst.

Fragestellung: Entfernung zur Haltelinie			
v_E [km/h]	30	50	70
Δp_L [m]	0,96	2,61	3,22
Δp_Q [m]	FS	FS	FS
$\Delta\theta$ [°]	-	-	-

Fragestellung: Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug			
v_R [km/h]	20	40	60
Δp_L [m]	0,21	0,86	0,33
Δp_Q [m]	0,25	0,25	0,25
$\Delta\theta$ [°]	-	-	-

Fragestellung: Aktuell befahrener Fahrstreifen			
Eine technologieunabhängige, eindeutige Zuordnung zum aktuell befahrenen Fahrstreifen muss gewährleistet sein.			

Fragestellung: Entfernung zu einem virtuellen Kollisionspunkt beim Kreuzen			
v_E [km/h]	30	50	70
Δp_L [m]	2,78	3,21	3,43
Δp_Q [m]	2,78	3,21	3,43
$\Delta\theta$ [°]	6,32	5,32	3,89

Fragestellung: Entfernung zu einem virtuellen Kollisionspunkt beim Abbiegen							
v_F [km/h]	4	10	15	20	30	50	70
Δp_L [m]	0,25	0,63	0,94	1,25	1,88	3,13	4,38
Δp_Q [m]	0,75	0,75	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5
$\Delta\theta$ [°]	-	-	-	-	-	-	-

Fragestellung: Assoziation kommunizierter mit lokal gemessenen Objekte	
Δp_L [m]	FL / 2
Δp_Q [m]	FB / 2
$\Delta\theta$ [°]	0,25

Tabelle 2: Zusammenfassende Übersicht der höchsten Anforderungen an die Fahrzeugeigenlokalisierung in Kreuzungsszenarien in Abhängigkeit der betrachteten Fragestellung (FS = Fahrspur; FB = Fahrzeugbreite; FL = Fahrzeuglänge); Δp_L und Δp_Q bedeuten jeweils die Relativposition in Längs- und Querrichtung, $\Delta\theta$, die relative Orientierung der Fahrzeug-Längsachsen

Szenario: L/I Längsverkehr			
v_A/v_C [km/h]	50	100	130
Δp_L [m]	0,67 ⁵ /1 ⁶	2,68 ⁵ /1 ⁶	4,53 ⁵ /1 ⁶
Δp_Q [m]	0,5	0,5	0,5
$\Delta\theta$ [°]	0,92	0,29	0,19

Szenario: L/II/63x Spurwechsel				
v_A/v_C [km/h]	60	60	80	80
v_B/v_D [km/h]	120	150	120	150
Δp_L [m]	0,97 ⁵ /1 ⁶	2,17 ⁵ /1 ⁶	0,43 ⁵ /1 ⁶	1,32 ⁵ /1 ⁶
Δp_Q [m]	0,5	0,5	0,5	0,5
$\Delta\theta$ [°]	0,68	0,35	1,28	0,53

Szenario: L/III Überholer-Gegenverkehr / Begegnende			
v_E [km/h]	30	50	70
Δp_L [m]	+/- 0,75	+/- 0,75	+/- 0,75
Δp_Q [m]	+/- 0,45	+/- 0,45	+/- 0,45
$\Delta\theta$ [°] Fahrzeugrichtung (vgl. Fußnote 5 S. 34)	+/- 0,15	+/- 0,15	+/- 0,15
$\Delta\theta$ [°] Geschwindigkeitsr (vgl. Fußnote 6, S. 34)	10	10	10

Szenario: L/IV/67x Fußgänger-Fahrzeug: Längsrichtung zur Fahrbahn			
v_E [km/h]	30	50	70
Δp_L [m]	+/- 2,7	+/- 4,6	+/- 6,4
Δp_Q [m]	+/- 0,6	+/- 0,6	+/- 0,6
$\Delta\theta$ [°]	+/- 1,1	+/- 2,3	+/- 2,3

Szenario: L/IV/4xx Fußgänger-Fahrzeug: Querrichtung zur Fahrbahn				
v_E [km/h]	30	30	50	70
V_{FG} [km/h] Fußgänger	5,4	12,6	12,6	12,6
Δp_L [m]	+/- 6,4	+/- 2,7	+/- 4,6	+/- 6,4
Δp_Q [m]	+/- 0,6	+/- 0,6	+/- 0,6	+/- 0,6
$\Delta\theta$ [°]	+/- 0,7	+/- 1,1	+/- 2,3	+/- 2,3

Szenario: L/V Fahrnunfall			
v_E [km/h]	30	50	70
Δp_L [m]		-	
Δp_Q [m] (zum Fahrbahnrand)		+/- 0,5	
$\Delta\theta$ [°]		+/- 0,5	

Tabelle 3: Zusammenfassende Übersicht der Anforderungen an die Fahrzeugeigenlokalisierung in ausgewählten Längsverkehrsszenarien

Wie eingangs beschrieben, stellt die Fahrzeugeigenlokalisierung eine wesentliche Voraussetzung für die im Rahmen von Ko-PER angestrebten sicherheitsrelevanten Applikationen dar. Daher wurden zu den oben definierten Anforderungen insgesamt sechs verschiedene Lokalisierungsansätze untersucht. Deren methodischen Grundlagen und Ergebnisse werden im den nachfolgenden Abschnitten des vorliegenden Kapitels 3.2 eingehender dargestellt. Im Einzelnen wurden folgende Lokalisierungsansätze untersucht:

- Eigenlokalisierung mit Bildfolgeauswertung, Laserscannern und Landmarken
- Eigenlokalisierung mit Laserscannern und Landmarken
- Eigenlokalisierung mit Tightly Coupled GNSS
- Eigenlokalisierung mit kooperativem GNSS u.a. an Kreuzungen

- Eigenlokalisierung mit Ko-TAG-Transpondern u.a. an Kreuzungen
- Eigenlokalisierung durch Fusion von einzelnen Lokalisierungsergebnissen

Eine Sonderstellung nimmt im Zusammenhang die in Ko-PER entwickelte Darstellung hochgenauer digitaler Karte ein. Einige der untersuchten Lokalisierungsansätze basieren nämlich auf dem sog. *MAP-Matching* präzise vermessener Landmarken mit hochgenauen digitalen Karten, deren Genauigkeit und Detailierungsgrad weit über die bisher zur Navigation verwendeten Karten hinausgeht. Da entsprechend präzise und detaillierte Karten kommerziell nicht verfügbar sind, wurde im Rahmen von Ko-PER ein geeignetes Karten-Datenformat spezifiziert und geeignete Kartenabschnitte instanziiert bzw. generiert. Die Genauigkeit der Karte übertrifft diejenigen aus den Lokalisierungsanforderungen bzw. ist mit diesen kompatibel

3.2.1.1 Ergebnisse

Basierend auf den Anforderungen an die Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeit aus den beschriebenen Fragstellungen wurden die Ergebnisse der einzelnen Lokalisierungsansätze hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit bewertet. Die Übersichten in Tabelle 4 für die Anforderungen im Kreuzungsbereich und Tabelle 5 für die Anforderungen im Längsverkehr vermitteln dabei einen groben Eindruck, welches Lokalisierungsverfahren bei welcher Fragestellung tendenziell nutzbar oder eher nicht nutzbar ist. Die genauen Ergebnisse mit den erzielten Positionierungs- und Orientierungsgenauigkeiten sind in den einzelnen Folgeabschnitten detailliert beschrieben.

Anforderung / Lokalisierungsmethode	Laserscanner & Landmarken ⁵	Tightly Coupled GNSS ⁶	Kooperatives GNSS ⁷	Ko-TAG ⁸
Entfernung zur Haltelinie	✓	✓	✓	✓
Zeitlücke zum vorausfahrendem Fahrzeug	✓	✗	✗	✗
Aktuell befahrener Fahrstreifen	✓	✓	✓	✓
Entfernung zu einem virtuellen Kollisionspunkt beim Kreuzen	✓	✓	✓	✓
Entfernung zu einem virtuellen Kollisionspunkt beim Abbiegen	✓	✗	✗	✗
Assoziation kommunizierter mit lokal gemessenen Objekten	✓	✗	✓	✓

Tabelle 4: Erfüllungsgrad der untersuchten Lokalisierungsansätze bzgl. Anforderungen des Kreuzungsverkehrs

Die Bedeutung der in Tabelle 4 (oben) und Tabelle 5 (unten) verwendeten Symbole lautet dabei wie folgt:

Erfüllt die Anforderungen	vollumfänglich	größtenteils	eher nicht	nicht
Verwendetes Symbol	✓	✓	✗	✗

⁵ Digitale Karte und Umgebung mit ausreichenden natürlichen Landmarken vorhanden

⁶ TCS ohne Fahrzeug-Sensorik (geringe Mehrwegeausbreitung und mittlere bis bessere Satellitensichtbarkeit)

⁷ Kreuzung ist mit Kommunikation ausgestattet; mindestens vier gemeinsame Satelliten

⁸ Bezieht sich nur auf Ko-TAG 2.0

Anforderung / Lokalisierungs- methode	Laserscanner und Landmarken (LM)	Bildfolgenaus- wertung und LM ⁹	Tightly Coupled GNSS (TCS)	Fusion ¹⁰
L / I Fließverkehr	✓	✓	✗	✓
L / II / 63x Fahrstreifenwechsel	✓	✓	✗	✓
L / III / Überholen – Gegenverkehr – Begegnende	✓	✓	✗	✓
L / IV / 67x Fahrzeug-Fußgänger in Längsrichtung zur Fahrbahn	✓	✓	✓	✓
L / IV / 4xx Fahrzeug-Fußgänger in Querrichtung zur Fahrbahn	✓	✓	✓	✓
L/V Fahrnunfall	✓	✓	✗	✓

Tabelle 5: Erfüllungsgrad der untersuchten Lokalisierungsansätze bzgl. Anforderungen des Längsverkehrs

Die Ergebnisse für den Einsatz in sicherheitsrelevanten Fahrzeuganwendungen erwiesen sich als vielversprechend; dies gilt – in Verbindung mit dem Tightly Coupled GNSS Ansatz – insbesondere für die Landmarken-basierten Verfahren, die durch die in Ko-PER entwickelte hochgenaue digitale Karte sehr gute Genauigkeiten und Verfügbarkeiten erzielten. Derzeit vorliegende Einschränkungen der Anwendungsbereiche der genannten Verfahren werden in den Folgeabschnitten diskutiert.

Die Fusion der Ergebnisse verschiedener Lokalisierungsansätze ist eine Möglichkeit, die Stärken der einzelnen Verfahren zu kombinieren, um somit eine breitere Basis für sicherheitssteigernde Fahrzeugapplikationen bereitzustellen.

3.2.2 Hochpräzise digitale Karten

Im Rahmen von Ko-PER wurden hochpräzise digitale Karten sowohl für Kreuzungen, als auch für den Überlandverkehr bereitgestellt. Entsprechend den Spezifikationen enthalten diese Karten folgende Elemente:

- Geometrische Repräsentationen von Fahrbahnmarkierungen
- Klassifizierte Fahrbahnmarkierungen (Typ, Farbe, Pfeilrichtung etc.)
- Verlauf von Fahrstreifen
- Eigenschaften von Fahrstreifen (mittlere Spurbreite, Höhen- und Breitenverlauf, etc.)
- Darstellung von Fahrbahnmarkierungen, Fahrstreifen-, Höhen- und Breitenverläufen mit Kreisbogen-Splines
- Klassifizierte Punktlandmarken zur Fahrzeugeigenlokalisierung

Die Kreuzungskarten wurden von SICK bereitgestellt. Die Repräsentation der Fahrbahn- und Fahrstreifenverläufe geschieht mittels *Polylines* (geraden Streckenfolgen) und entspricht damit der MAP-Nachricht zur Darstellung der Geometrie und Topologie von Kreuzungen. Die Darstellung der Straßenverläufe außerorts bediente sich dagegen der so genannten Kreisbogen-Splines (vgl. Abbildung 13); die Konzeption und die Erstellung der Überlandkarten erfolgte durch FORWISS. Mit SICK Laserscannern eingemessene Punktlandmarken vervollständigen beide Kartentypen.

⁹ Fahrbahnmarkierungen und natürliche Landmarken vorhanden

¹⁰ Fusion aus *Loosly-* und *Tightly-Coupled* GNSS und Ko-TAG 2.0 Transpondern (Anmerkung: *Loosely Coupled* GNSS Serienvarianten integrieren odometrische Fahrzeuginformationen)

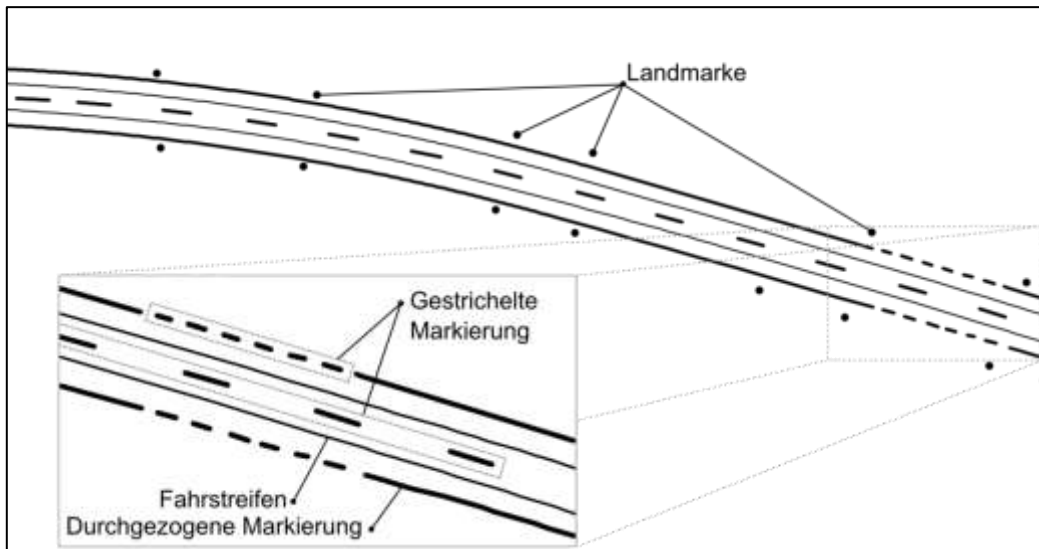


Abbildung 13: Elemente der digitalen Überlandkarte. Fahrstreifen und Fahrbahnmarkierungen sind als attribuierte Kreisbogen-Splines hinterlegt

3.2.2.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Die digitale Karte wird in Form der spezifizierten SQLite-Datenbank bereitgestellt. Darüber hinaus liegen die Karten im OSM-XML-Format vor.

Erstellt wurden hochgenaue digitale Karten einer Überlandstrecke im Norden von München und Karten zweier Kreuzungen in Ulm und Aschaffenburg. Die Daten wurden durch Abfahren der Strecken mit Fahrzeugen gewonnen, die mit geeigneter Onboard-Sensorik und einem entsprechenden Referenzsystem ausgestattet waren.

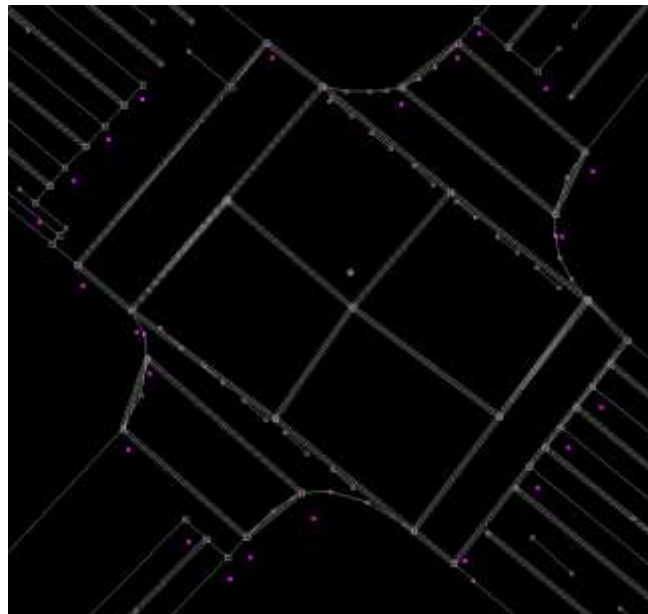
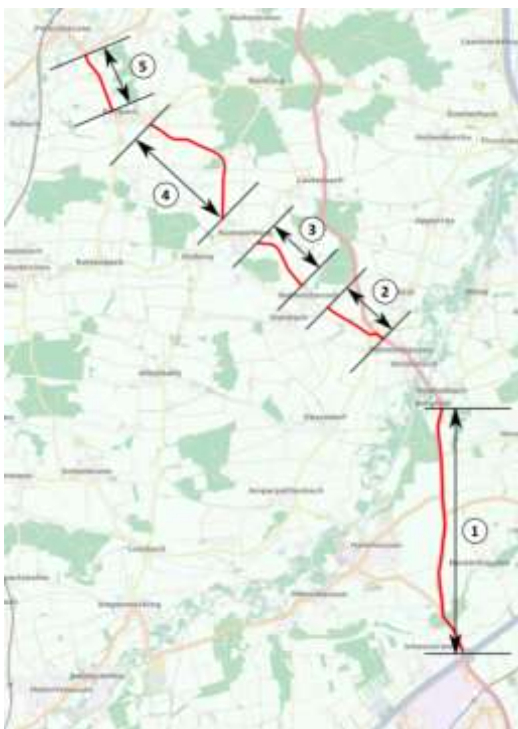


Abbildung 14: Die linke Grafik zeigt Streckenabschnitte mit verfügbarer digitaler Karte der Überlandstrecke im Norden von München. Rechts ist ein Ausschnitt der Karte der Kreuzung in AB dargestellt

3.2.2.2 Erzielte Ergebnisse

Sowohl zur Bestimmung der Ortsgenauigkeit der Straßenmarkierungen sowie der Fahrstreifenverläufe als auch für die Positionen der Punktlandmarken zur Fahrzeugeigenlokalisierung sind vom Projektpartner BMW Referenzpunkte mit einer Genauigkeit von 3 cm eingemessen und bereit gestellt worden. Die Referenzpunkte wurden so gewählt, dass sie sehr einfach mit Stützpunkten aus den digitalen Karten assoziiert und verglichen werden können.

Zur Genauigkeitsevaluierung der Fahrbahnmarkierungen wurden die aufgezeichneten Referenzpunkte mit den entsprechenden Elementen in der Karte assoziiert. Dadurch ließen sich Positionsabweichungen quantitativ bewerten (siehe Tabelle 6). Darüber hinaus konnten die Referenzpunkte zur lokalen Nachjustierung der Karte genutzt werden. Die Auswirkungen dieses Optimierungsschrittes können ebenfalls der Tabelle entnommen werden. Grundlage der Evaluierung ist das Kartenmaterial vom 08.03.2012. Zunächst ist die Evaluierung der ausgedehnten Landmarken (Fahrbahnmarkierungen) dargestellt:

	Fehler ohne Nutzung der Referenzdaten	Fehler mit Nutzung der Referenzdaten
Mittelwert	0,23 m	0,12 m
Maximum	0,52 m	0,33 m
Sigma (1 σ)	0,15 m	0,03 m

Tabelle 6: Statistische Auswertung der Positionsabweichung von Fahrbahnmarkierungen mit und ohne Nutzung von Referenzpunkten zur Korrektur

	Fahrstreifen	Fahrbahnmarkierungen
Anzahl Kreisbogenspline-Segmente	12	1331
Gesamtlänge	24436,85 m	16496,80 m
Ø Splinelänge	2036,40 m	12,39 m
max. Splinelänge	5136,36 m	2244,27 m
Streckensegmente		
Anzahl	0	1313
max. Länge	-	45,01 m
Ø Länge	-	3,25 m
Kreisbogensegmente		
Anzahl	327	185
max. Länge	316,14 m	315,20 m
Ø Länge	74,73 m	66,07 m

Tabelle 7: Statistische Daten über Fahrstreifen und Fahrbahnmarkierungen in der digitalen Überlandkarte

Die Fahrstreifen-Repräsentationen basieren auf den Fahrbahnmarkierungen. Daher sind die Genauigkeitsangaben auf die Fahrstreifen übertragbar. In Tabelle 7 sind einige statistische Daten über die Geometrie von Fahrbahnmarkierungen und Fahrstreifenrepräsentationen aufgelistet.

Für die Validierung der Ortsgenauigkeit der bereitgestellten Punktlandmarken zur Fahrzeugeigenlokalisierung wurde zunächst eine manuelle Assoziation der verfügbaren Referenzpositionen von Landmarken mit den dazugehörigen Positionen aus der digitalen Karte durchgeführt.

Die statistische Auswertung der Positionsabweichung der assoziierten Daten ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Demnach haben die bereitgestellten Punktlandmarken eine mittlere Ab-

weichung von ca. 41 cm. Nutzt man zusätzlich die Referenzdaten und verschiebt alle Punktlandmarken, lässt sich die mittlere Abweichung auf ca. 31 cm reduzieren.

	Ergebnisse ohne Nutzung der Referenzdaten	Ergebnisse mit Nutzung der Referenzdaten
Mittelwert	41,63 cm	31,95 cm
Minimum	14,39 cm	3,47 cm
Maximum	89,95 cm	112,81 cm
Sigma (1σ)	16,58 cm	21,44 cm

Tabelle 8: Statistische Auswertung der Positionsabweichung der bereitgestellten Punktlandmarken mit den dazugehörigen Referenzwerten

3.2.3 Landmarken, Video und Laserscanner

Ziel der Fahrzeugeigenlokalisierung ist die Schätzung der so genannten globalen Pose (Position und Orientierung) des Fahrzeugs. Die zu bestimmenden Parameter beziehen sich dabei auf die 3D-Position und Orientierung des Fahrzeugs. Der von FORWISS entwickelte Eigenlokalisierungsansatz nutzt hochgenaue digitale Karten und Videodaten einer Mono-Grauwertkamera. Die longitudinale Positionierungsgenauigkeit verbessert sich durch die Hinzunahme von Laserscanner-Punktlandmarken.

3.2.3.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Zur Schätzung der Lageparameter wird eine sequentielle Monte-Carlo Methode („Partikelfilter“) eingesetzt, welche die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion über dem Zustandsraum durch eine endliche Stichprobe („Partikel“) approximiert. Dieser stochastische Filteransatz erfordert einerseits ein dynamisches Modell, das die Bewegung des Fahrzeugs in Abhängigkeit der Zeit beschreibt und andererseits Beobachtungsmodelle, welche die Zustandsschätzung mit Hilfe von Messwerten aktualisieren. In die dynamischen Modelle und Beobachtungsmodelle fließen dabei Informationen aus der Fahrdynamik, der fahrzeuglokalen Perzeption sowie der digitalen Karte ein.

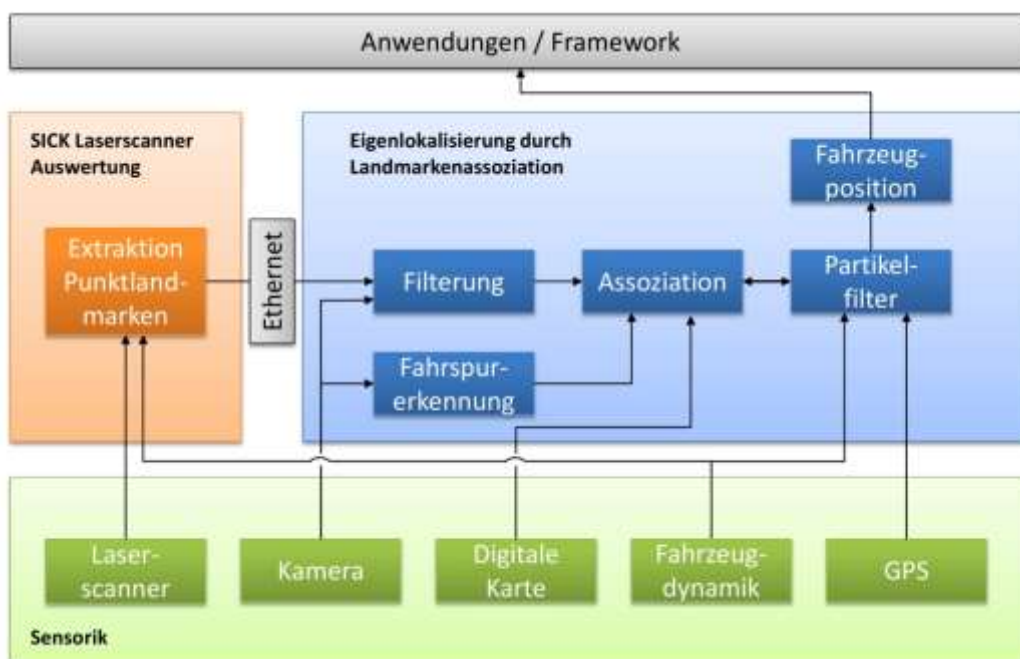


Abbildung 15: Blockdiagramm: Lokalisierungsansatz basierend auf Bildfolgen- und Laserscanner-Auswertung

Bei diesem Ansatz werden folgende Datenquellen für die Schätzung der Fahrzeugposition genutzt:

- Bilddaten einer Kamera
- Laserscanner Punktlandmarken
- Fahrzeugdynamikdaten
- GPS / GNSS
- Digitale Karte

Die Auswertung dieser Daten ist in zwei Hauptmodule geteilt. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Ergebnisse des gewählten Ansatzes.

Zur Verwendung der digitalen Karte wurde ein Softwaremodul entwickelt, welches die Karteninformationen aus einer Datenbank gemäß der Spezifikation der digitalen Karte in hocheffiziente Zugriffsstrukturen verbringt. Entsprechende Zugriffsmethoden erlauben Bereichsanfragen an die Karte in Echtzeit und liefern zu einer gewünschten Region alle verfügbaren Kartenelemente.

Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung als Funktion der Zeit wurden verschiedene Modelle umgesetzt. Darunter fallen u.a. die Varianten „Modell konstanter Geschwindigkeit“, „Modell konstanter Gierrate“ sowie kombinierte Modelle, die jeweils unter Verwendung von Zeitstempeln für die Prädiktion des Fahrzeugzustands herangezogen werden können. Im Rahmen eines adaptionsfähigen Software-Frameworks können diese Modelle gegeneinander ausgetauscht werden.

Fahrzeugdynamik: Fahrdynamikinformationen wie Geschwindigkeit, Gierrate und Schwimmwinkel gehen als Parameter in die Zustandsschätzung ein, da sie das dynamische Modell des Fahrzeugs beeinflussen. Entsprechende Module, die verschiedene Fahrdynamikmodelle realisieren, wurden umgesetzt und erfolgreich getestet.

GNSS: GNSS Daten dienen zur Grobpositionierung und zur Initialisierung der Lokalisierungslösung. Dabei ist zu beachten, dass die so gelieferte Positionsangabe mehrere Meter von der tatsächlichen Fahrzeugposition abweichen kann.

Assoziation: Die fahrzeuglokale Perzeption liefert Messdaten von verschiedenen Sensoren des Fahrzeugs, beispielsweise Laserscanner und Kamera. Andererseits stehen Referenzinformationen wie punktförmige Landmarken und Straßenmarkierungen aus der digitalen Karte zur Verfügung. Ziel der Assoziation ist es, Sensordaten mit Karteninformationen sinnvoll zu assoziieren, um mit Hilfe geeigneter Optimierungsverfahren auf die Fahrzeugpose zu schließen.

Die aus der videobasierten Fahrspurerkennung gewonnenen Daten werden mit Fahrspurmarkierungen der digitalen Karte verknüpft. Dabei wird die Assoziation als prototypisches Passproblem betrachtet. Es zeigt sich, dass dieser Ansatz äußerst vielversprechend ist und sich sehr gut zur Bestimmung der lateralen Position und der Orientierung eignet.

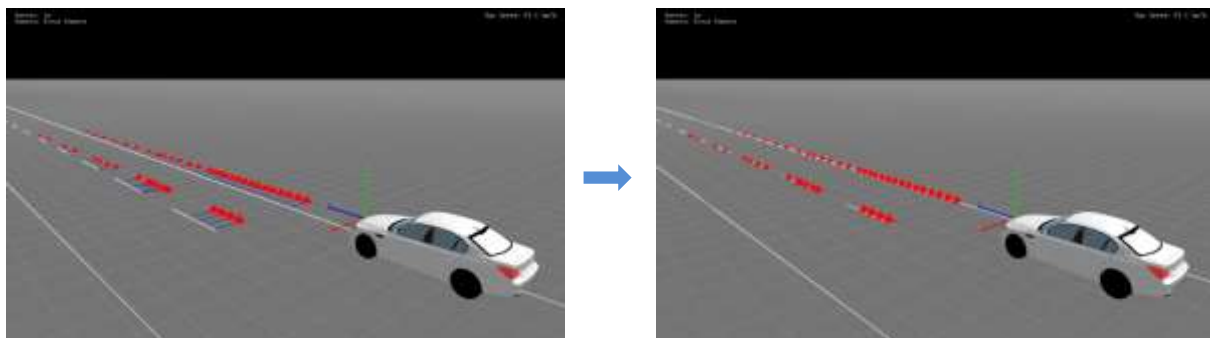


Abbildung 16: Assoziation von Messpunkten der Fahrspurerkennung mit Markierungslinien der digitalen Karte

Für die longitudinale Positionsbestimmung werden Punktlandmarkenkandidaten, die aus Laserscanner-Datenverarbeitung gewonnen werden, mit Landmarken aus der digitalen Karte

assoziiert. Unter Zuhilfenahme eines geeigneten Fehlermaßes, wie z.B. der Mahalanobis-Distanz, kann so die Partikelgewichtung der Zustandsschätzung bestimmt werden.

Lagebestimmung: Da *a priori* keine Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zustandsraums gemacht werden, unterstützt das Partikelfilter Multimodalität, was die parallele Modellierung mehrerer Lagehypothesen ermöglicht. Dabei bietet es sich an, Hypothesen für einzelne Fahrstreifen der digitalen Karte zu modellieren. Entsprechende Methoden sowie die Bestimmung der aktuell wahrscheinlichsten Lage aus dem Partikelfilterzustand durch Verfahren der Mustererkennung wurden erfolgreich umgesetzt und getestet.

3.2.3.2 Erzielte Ergebnisse

Im Zuge des Integrationstests im BMW-Versuchsträger am 16.04.2012 wurde die Funktionalität des Systems im Online-Betrieb überprüft. Dabei konnte die volle Funktionstüchtigkeit und Echtzeitfähigkeit aller Komponenten der Eigenlokalisierungsstrategie bestätigt werden. Die Testfahrt fand bei starker Bewölkung und Regen statt, womit die Robustheit des Verfahrens gegenüber schwierigen Wetterbedingungen nachgewiesen wurde.

Beispielhaft wurde zur Evaluierung ein ca. 5,5 km langer Ausschnitt der Münchner Überlandstrecke gewählt (vgl. Abbildung 14, gewählter Abschnitt: 1). Dabei ist zu beachten, dass die Datensequenz zur Evaluierung der Lokalisierung nicht mit dem Datensatz zur Erstellung der digitalen Karte identisch ist. Die dargestellten Fehlerplots beziehen sich dabei auf das sog. *Body*-Koordinatensystem des Versuchsträgers. Die Abweichungen wurden mit Hilfe der im Versuchsträger verfügbaren *High-End* Referenz-Positioniereinheit ermittelt, deren Genauigkeit ebenfalls angegeben ist. Abbildung 17 bis Abbildung 19 zeigen die vorzeichenbehafteten Fehler für den Streckenabschnitt 1 der Überlandstrecke. Der mittlere Fehler und die Standardabweichung, die in den Bildunterschriften angegeben sind, basieren dagegen auf absoluten Fehlern. Diese deuten auf einen systematischen Messfehler hin, der tendenziell auf Ungenauigkeiten der extrinsischen Kalibrierung im Zehntelgradbereich bei der Messfahrt und/oder bei der Kartenerstellung zurückzuführen ist.

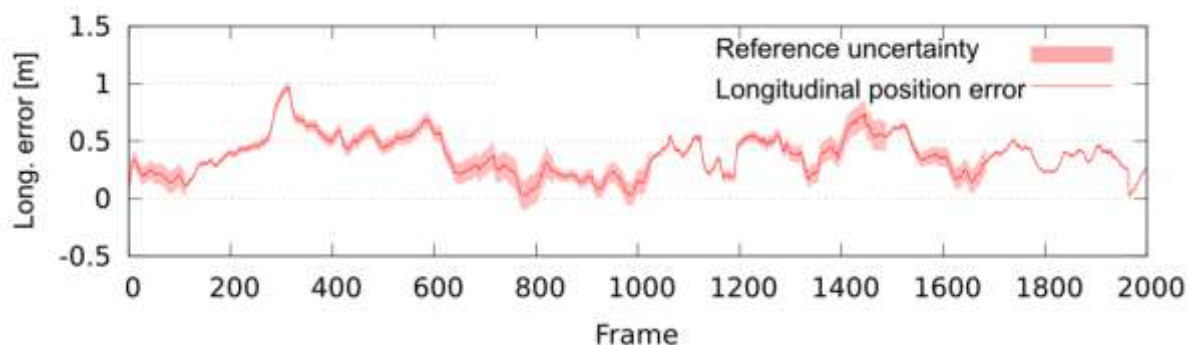


Abbildung 17: longitudinaler Positionsfehler: $\mu=0,12$ [m], $\sigma=0,10$ [m]

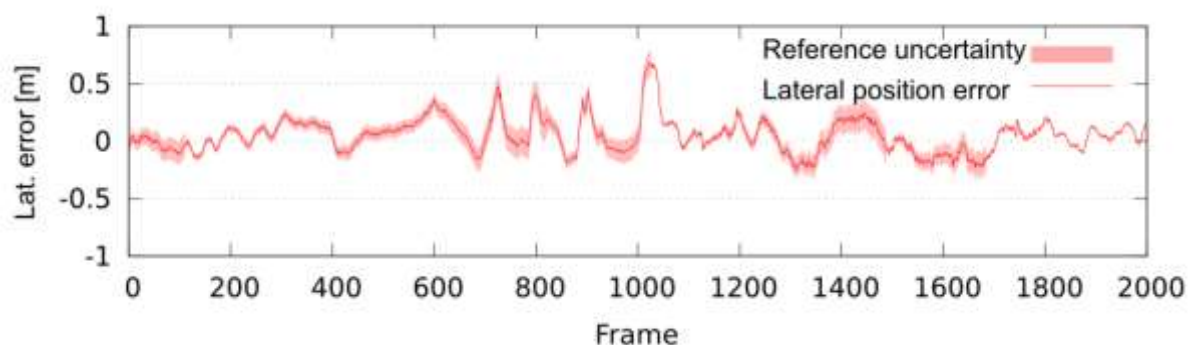


Abbildung 18: lateraler Positionsfehler: $\mu=0,38$ [m], $\sigma=0,17$ [m]

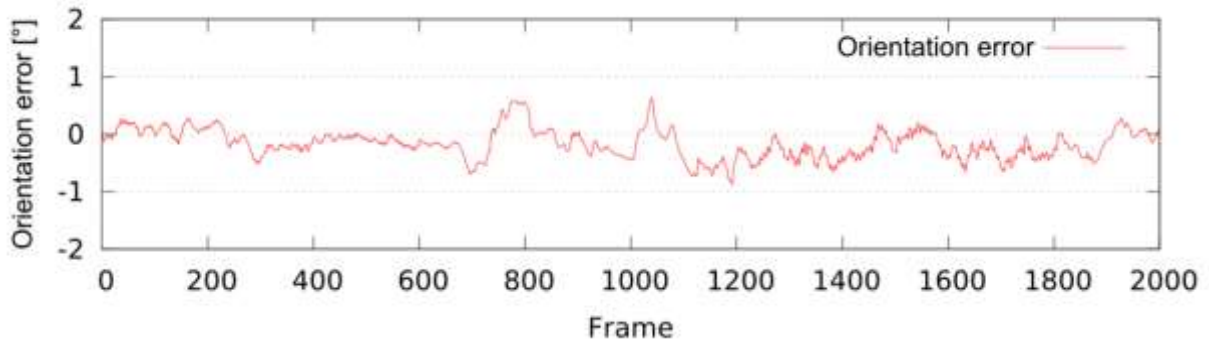


Abbildung 19: Orientierungsfehler: $\mu=0,25$ [°], $\sigma=0,18$ [°]

Abbildung 20 zeigt eine perspektivische Darstellung verschiedener relevanter Informationen, die beim oben beschriebenen Eigenlokalisierungsverfahren verwendet werden.

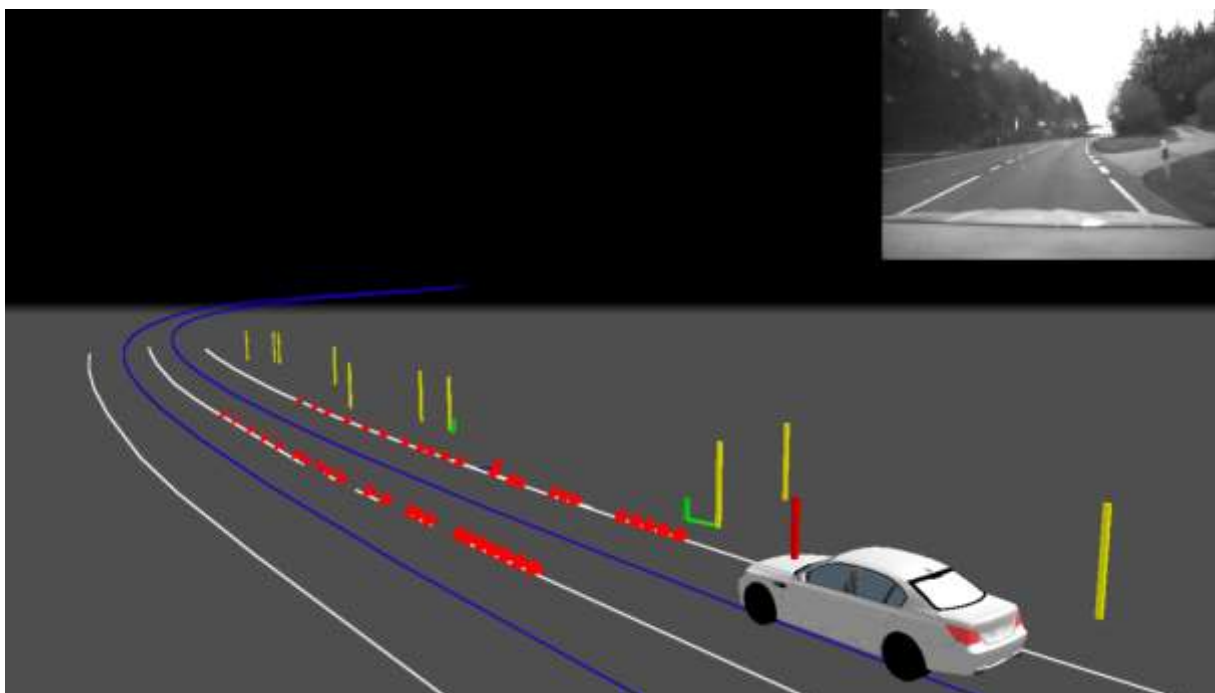


Abbildung 20: Ausschnitt eines Abschnitts der Münchner Überlandstrecke; Erläuterungen siehe Text

Im Einzelnen dargestellt ist

- das Eigenfahrzeug an aktuell geschätzter Position,
- die Mitte der Fahrstreifen (blau),
- die Fahrbahnmarkierungen (weiß),
- Landmarken der digitalen Karte (gelb),
- RT-Referenzmessung (roter Stab) bezogen auf das BMW-Emblem der Motorhaube
- Korrespondenzen zwischen lokal gemessenen Landmarken und Landmarken aus der digitalen Karte (grün),
- Messungen auf Fahrspurmarkierungen (rote Pyramiden).

3.2.4 Landmarken und Laserscanner alleine (TAP 2.640)

Der Laserscanner-basierte Eigenlokalisierungsansatz berechnet eine zeitlich zuordenbare 2D-Position zusammen mit einer Orientierung gegenüber dem geodätischen Referenzsystem WGS84. Weiterhin wird eine Güte über den aktuellen Zustand der Eigenlokalisierung bereitgestellt. Die Höhenlage wird von dem untersuchten Verfahren Prinzip bedingt nicht

direkt ermittelt. Es kann jedoch die mit begrenzter Genauigkeit verfügbare Höhe aus der für die Initialisierung notwendigen GNSS-Position verwendet werden.

Im folgenden Abschnitt wird das Funktionsprinzip der Laserscanner-basierten Fahrzeugeigenlokalisierung unter Nutzung von Landmarken aus einer hochgenauen digitalen Karte sowie Lokalisierungsergebnisse beschrieben und diskutiert. Dazu wird zunächst der generelle Lokalisierungsansatz auf Basis eines erweiterten Kalman Filters mit bekannten Assoziationen beschrieben. Anschließend wird auf die Auswertung der Laserscanner-Messwerte und die Extraktion von Landmarken-Kandidaten (LMK) eingegangen, sowie das Assoziationsverfahren dieser LMK mit den Punktländern aus der digitalen Karte erläutert. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse für den Einsatz an der Ko-PER-Testkreuzung in Aschaffenburg sowie im Münchner Überlandverkehr dargestellt und bewertet.

3.2.4.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Das Funktionsprinzip des Ansatzes zur Fahrzeugeigenlokalisierung auf Basis von Laserscannern und Landmarken ist in Abbildung 21 schematisch dargestellt. Den Kern des Ansatzes bildet ein erweiterter Kalman-Filter mit bekannten Assoziationen. Der Kalman-Filter wird mit einer vorhandenen GNSS-Position (Genauigkeit ca. 5-15 m) initialisiert. Für das Kalman-Update werden sogenannte Landmarkenkandidaten, die aus den Laserscanner-Messdaten gewonnen werden, mit Punktländern aus einer digitalen Karte (Genauigkeit mind. 0,5 m) assoziiert. Der Abstand und der Winkel der Landmarken-Kandidaten in Bezug auf die assoziierten Punktländer sind die Eingangsdaten für den Update-Schritt des Kalman-Filters. Die Prädiktion im Kalman-Filter wird unter Nutzung der Eigengeschwindigkeit und Gierrate des Fahrzeugs durchgeführt. Der aktuelle Zustand des Kalman-Filters modelliert die Fahrzeugeigenposition sowie die Orientierung des Fahrzeuges.

Die zu erwartende Gesamtgenauigkeit dieses Lokalisationsansatzes liegt bei bestmöglichen Umgebungsbedingungen (ausreichende Anzahl korrekt assoziierter Landmarken) in der Größenordnung der Kartengenauigkeit, bestenfalls jedoch bei ca. 20 cm. Wird die Genauigkeit des Algorithmus schlechter als die der initialen GNSS-Position, wird diese auf die GNSS-Positionengenauigkeit begrenzt. Diese Genauigkeit ist bei den gegebenen Voraussetzungen sowohl an den Kreuzungen als auch im Überlandbereich zu erwarten.

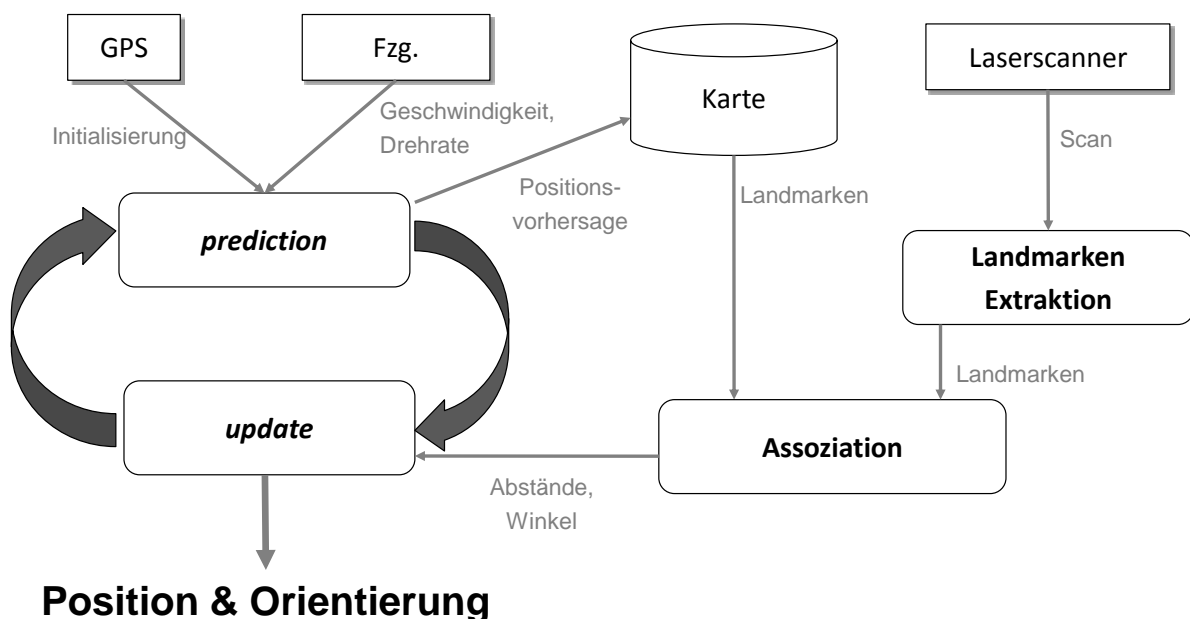


Abbildung 21: Funktionsprinzip der Fahrzeugeigenlokalisierung auf Basis von Laserscannern und Landmarken

Als Landmarkenkandidaten werden horizontal geringfügig ausgedehnte, stationäre Objekte verwendet. Das können zum Beispiel Leitpfosten, die Pfähle von Straßenlaternen und Verkehrsschildern, dünne Bäume etc. sein. Die Positionen dieser Objekte können mit einem

Laserscanner aufgrund seiner hohen Winkelauflösung sehr robust detektiert werden. Entsprechende Signale werden aus den Laserscanner-Daten extrahiert und in eine Belegungswahrscheinlichkeitskarte eingetragen. Diese Karte wird unter Berücksichtigung der Fahrzeugeigenbewegung verschoben und gedreht, sodass die Relativpositionen der relevanten stationären Objekte der Fahrzeugumgebung stets aktuell sind. Auf dieser Belegungswahrscheinlichkeitskarte wird anschließend eine Konturextraktion durchgeführt. Die daraus resultierenden Konturen werden unter Berücksichtigung ihrer Ausdehnung gefiltert. Die verbleibenden Konturen bilden die Kandidaten für die Assoziation mit Punktlandmarken aus einer digitalen Karte.

Abbildung 22 zeigt beispielhaft eine Belegungswahrscheinlichkeitskarte. In Rot sind extrahierte Landmarkenkandidaten auf Basis dieser Karte dargestellt.

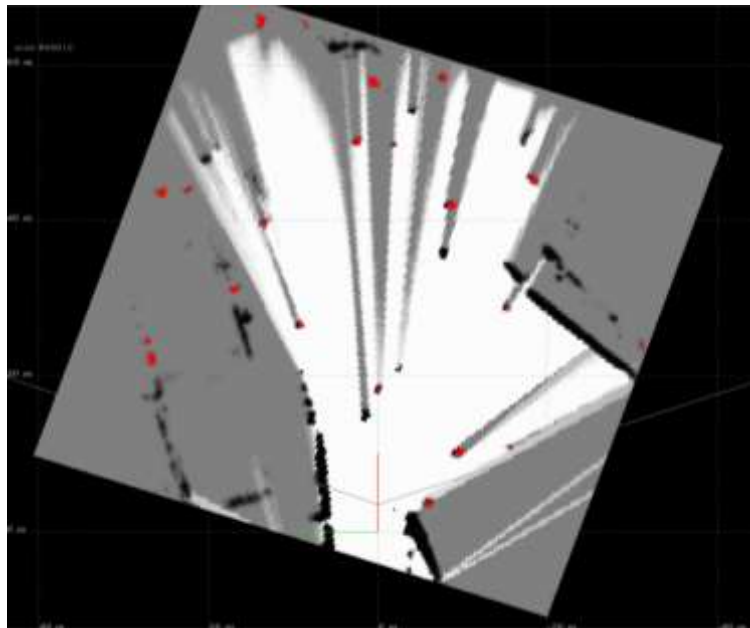


Abbildung 22: Belegungswahrscheinlichkeitskarte auf Basis von Laserscanner-Messungen und extrahierte Landmarkenkandidaten (rot)

Für die Berechnung der Fahrzeugeigenposition auf Basis eines erweiterten Kalman-Filters mit bekannten Assoziationen muss eine korrekte Zuordnung der Punktlandmarken aus der digitalen Karte mit den extrahierten Landmarkenkandidaten aus den Laserscanner-Daten erfolgen. Um Fehlzuordnungen und somit eine fehlerhafte Berechnung der Fahrzeugeigenposition zu vermeiden, müssen Vorkehrungen getroffen werden, die eine robuste Zuordnung ermöglichen. Dazu wurden bekannte Methoden aus der Literatur für den Einsatz unter realen Umgebungsbedingungen angepasst und erweitert. Im Wesentlichen erfolgen die dabei umgesetzten Assoziationsmethoden in drei Stufen. Ausgehend von der aktuellen Fahrzeugposition und einem vorgegebenen Radius werden zunächst alle Punktlandmarken aus der digitalen Karte extrahiert. Um jede Punktlandmarke wird ein Assoziationsgebiet für die Landmarkenkandidaten aufgespannt, der die aktuelle Positionsgenauigkeit des Eigenfahrzeugs berücksichtigt. Im ersten Assoziationsschritt werden alle Landmarkenkandidaten, die in den aufgespannten Assoziationsgebieten liegen, der jeweiligen Punktlandmarke zugeordnet (Abstandskriterium). Dabei besteht jedoch die Möglichkeit, dass einer Punktlandmarke mehrere Landmarkenkandidaten zugeordnet werden bzw. ein Landmarkenkandidat mehreren Punktlandmarken zugeordnet wird. Um die Zahl dieser Mehrfachzuordnungen zu reduzieren, wird im zweiten Schritt ein Dreiecksvergleich von jeweils drei Punktlandmarken zu jeweils drei der bisher zugeordneten Landmarkenkandidaten durchgeführt (Dreieckskriterium). Alle Landmarkenkandidaten, die nicht dem Dreieckskriterium entsprechen, werden wieder entfernt. In der dritten Stufe werden mehrfach assoziierte Landmarkenkandidaten auf Basis ihrer Detektions- und Assoziationshäufigkeit aus vorhergehenden Messzyklen priorisiert. Landmarkenkandidaten, die bereits zuvor erfolgreich assoziiert wurden, werden höhere priorisiert als neu auftre-

tende Kandidaten. Bestehen nach diesem Schritt noch immer Mehrfachassoziationen, werden diese weggelassen, falls ausreichend viele andere Assoziationspaare verfügbar sind, anderenfalls werden sie alle berücksichtigt. Alle verbleibenden Landmarkenkandidaten werden eindeutig zu den jeweiligen Punktlandmarken aus der digitalen Karte assoziiert.

Die Abstände und Winkel aller auf diese Weise ermittelten assoziierten Paare aus Punktlandmarken und Landmarkenkandidaten werden zur Aktualisierung des erweiterten Kalman-Filters verwendet. Die resultierende 2D-Position und die Orientierung werden durch die Zustandsgrößen des Kalman-Filters beschreiben, die Güte entspricht der Kovarianz des Filters.

3.2.4.2 Erzielte Ergebnisse

Im Versuchsträger des Projektpartners BMW ist ein funktionsfähiger Demonstrator dieses Eigenlokalisierungsansatzes verfügbar. Der oben beschriebene Algorithmus läuft auf einem separaten Industrie-PC (ECU). Die Ergebnisse können über ein spezifiziertes Protokoll schritthaltend abgerufen und genutzt werden.

Der Lokalisierungsansatz ist sowohl für den Einsatz im Überlandbereich als auch im innerstädtischen Bereich, insbesondere an Kreuzungen geeignet, vorausgesetzt, es sind ausreichend viele Landmarken für den Laserscanner sichtbar. Die durchgeführten Ergebnisauswertungen beziehen sich auf einen in Ko-PER spezifizierten Überlandbereich im Norden von München (vgl. Abbildung 23) sowie auf die Ko-PER-Testkreuzung in Aschaffenburg (vgl. Abbildung 24).

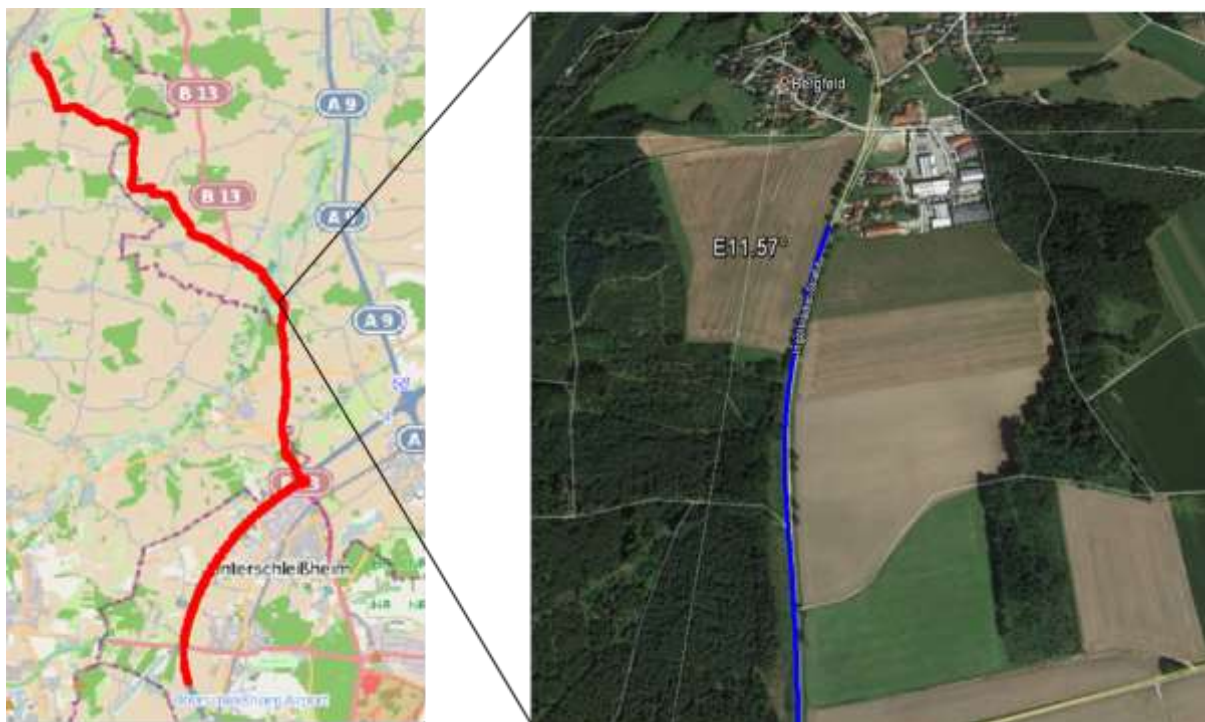


Abbildung 23: Ausgewertete Überlandstrecke nördlich von München



Abbildung 24: Ausgewerteter Bereich an der Ko-PER Testkreuzung in Aschaffenburg

In Abbildung 25 sind die lateralen und longitudinalen Positionierungsfehler sowie in Abbildung 26 der Orientierungsfehler für die Überlandstrecke über der Zeit dargestellt. Die durchschnittlichen Genauigkeitswerte sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

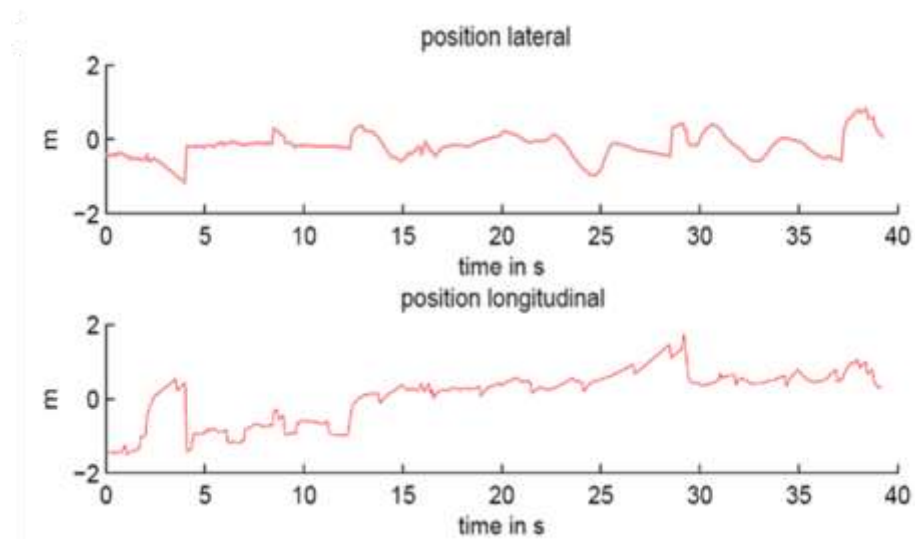


Abbildung 25: Lateraler (oben) und longitudinaler (unten) Positionsfehler auf der Überlandstrecke, bezogen auf das Referenzsystem. Die Werte der Ordinate entsprechen Metern.

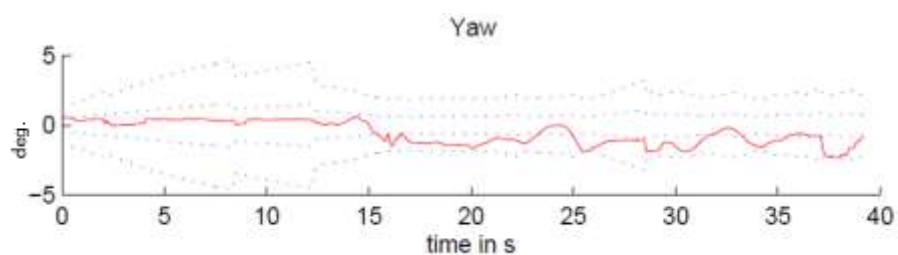


Abbildung 26: Orientierungsfehler auf der Überlandstrecke, bezogen auf das Referenzsystem

Fehlerart / Messgenauigkeit	Mittelwert μ	Standardabweichung σ
Lateraler Positionsfehler	0,23 m	0,28 m
Longitudinaler Positionsfehler	0,10 m	0,70 m
Orientierungsfehler	0,58 °	0,83 °

Tabelle 9: Mittelwert und Standardabweichung der Laserscanner-basierten Fahrzeugeigenlokalisierung auf der Überlandstrecke¹¹

Ebenso notwendig für die Bewertung des geschilderten Verfahrens ist die Verfügbarkeit des Lokalisierungsansatzes. Abbildung 27 zeigt die prozentuale Verfügbarkeit der Lokalisationslösung in Abhängigkeit zur geforderten Genauigkeit. Setzt man eine fahrspurgenaue Lokalisierung zugrunde, wie sie in Ko-PER gefordert ist (laterale Abweichung < 1 m, longitudinale Abweichung < 2 m), ergibt sich für den beschriebenen Lokalisierungsansatz eine Gesamtverfügbarkeit von ca. 86%.

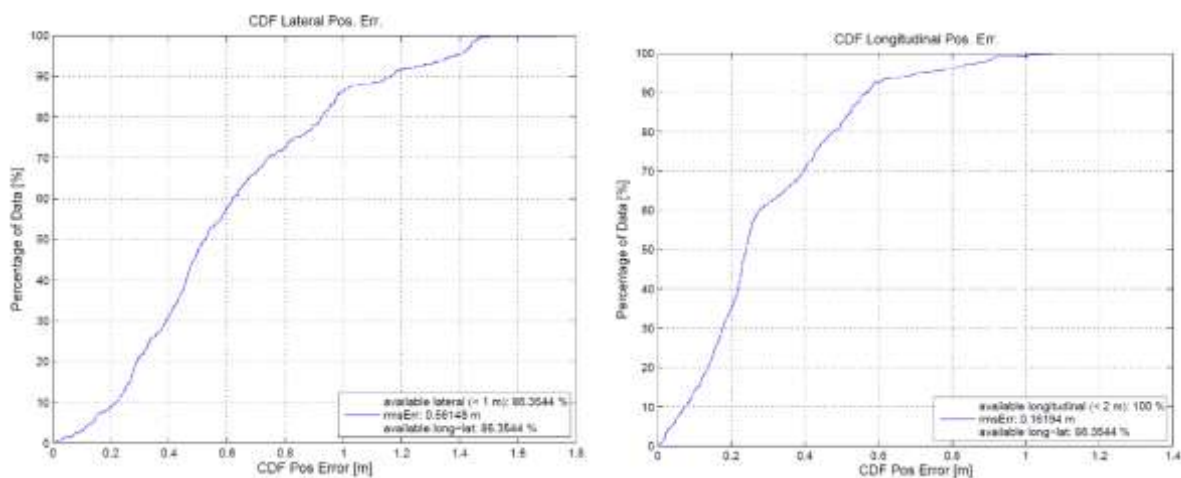


Abbildung 27: Verfügbarkeit des Positionierungssystems in lateraler (links) und longitudinaler Richtung (rechts) in Bezug auf die Positionierungsgenauigkeit

In gleicher Weise sind in Abbildung 28 die lateralen und longitudinalen sowie in Abbildung 29 der Orientierungsfehler für den Bereich der Aschaffener Testkreuzung über der Zeit dargestellt. Die entsprechende prozentuale Verfügbarkeit des Lokalisationssystems in Abhängigkeit zur geforderten Genauigkeit gemäß Abbildung 30 zeigt zudem eine noch höhere Verfügbarkeit im Kreuzungsbereich von über 96%, wenn man erneut eine fahrspurgenaue Lokalisierung zugrunde legt. Die durchschnittlichen statistischen Werte für die Lokalisierungsergebnisse im Kreuzungsbereich sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass bei dichtem Verkehr möglicherweise viele der in der digitalen Karte verzeichneten Landmarken verdeckt sind, was die Lokalisierungslösung nachteilig beeinflussen kann.

¹¹ Anmerkung zu den Tabelle 9 und Tabelle 10: Der Mittelwert des Fehlers wurde aus den Vorzeichenbehafteten Abweichungen gebildet um ggf. auftretende systematische Fehler auszuweisen. Positive und negative Abweichungen heben sich daher partiell auf. Der Absolutwert der festgestellten Abweichungen ist der Standardabweichung zu entnehmen. Mit Ausnahme des mittleren lateralen Positionsfehlers der Tabelle 10 liegen alle Fehlermittelwerte innerhalb der Standardabweichung, was systemische Fehler signifikanter Größe ausschließt.

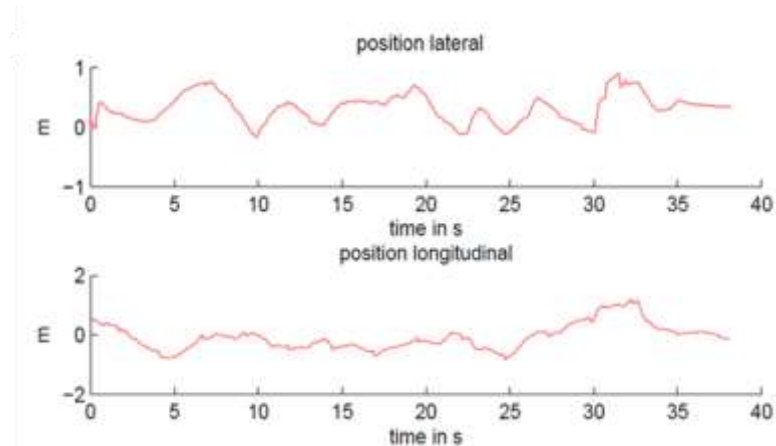


Abbildung 28: Lateraler (oben) und longitudinaler (unten) Positionsfehler (unten) im Kreuzungsbereich, bezogen auf das Referenzsystem. Die Werte der Ordinate entsprechen Metern.

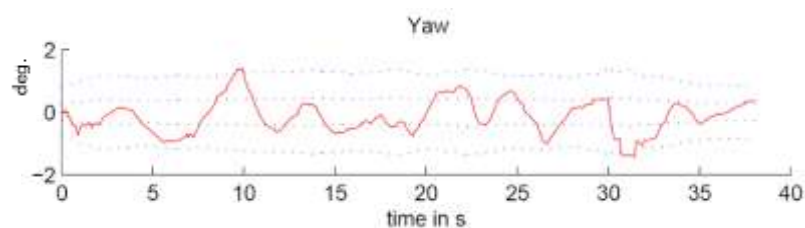


Abbildung 29: Orientierungsfehler im Kreuzungsbereich bezogen auf das Referenzsystem

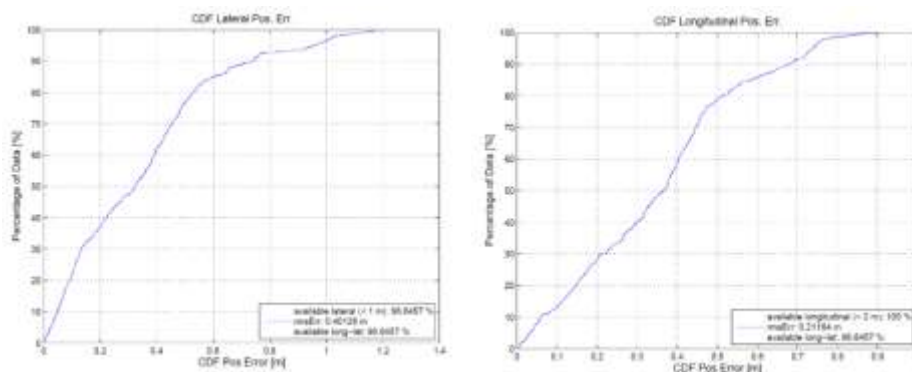


Abbildung 30: Verfügbarkeit des Positionierungssystems in lateraler (links) und longitudinaler Richtung (rechts) in Bezug auf die Positionierungsgenauigkeit

Fehlerart / Messgenauigkeit	Mittelwert μ	Standardabweichung σ
Lateraler Positionsfehler	0,34 m	0,22 m
Longitudinaler Positionsfehler	0,07 m	0,43 m
Orientierungsfehler	0,15 °	0,53 °

Tabelle 10: Mittelwert und Standardabweichung der Laserscanner-basierten Fahrzeug-Eigenlokalisierungslösung im Bereich der Aschaffener Kreuzung, vgl. Fußnote 11 auf Seite 46

In Bezug auf die definierten Anforderungen an die Fahrzeugeigenlokalisierung zeigt der Laserscanner-basierte Ansatz unter Nutzung von Landmarken sowohl im Überland- als auch im Kreuzungsbereich sehr gute Ergebnisse. Zum einen entsprechen die erzielten Genauigkeiten an Positionierung und Orientierung sehr gut den Anforderungen, zum anderen erwies sich die Verfügbarkeit der fahrstreifengenauen Lokalisierung mit 86% bzw. 96% als vergleichsweise hoch.

Voraussetzung für diese guten Ergebnisse ist allerdings eine hinreichend genaue digitale Karte, in der die aktuellen Umgebungsbegebenheiten verzeichnet sind. In der Regel verändert sich die Umgebung im Lauf der Zeit nur geringfügig, soll heißen, Straßenschilder, Laternenmasten und Leitpfosten werden nur selten ab- bzw. neu aufgebaut. Der Lokalisierungsansatz stößt jedoch an seine Grenzen, wenn ein kompletter Ortsabschnitt z.B. aufgrund von Bauarbeiten baulich verändert wird oder die für den Lokalisierungsansatz erforderlichen Punktlandmarken für den Laserscanner verdeckt sind. In diesem Fall steht beim rein Laserscanner-basierten Landmarkenverfahren nur noch die Genauigkeit der zugrundeliegenden GNSS-Lokalisierung zur Verfügung, die zum initialen Kartenabgleich notwendig, für sicherheitsrelevante Fahrzeugapplikation jedoch in der Regel nicht ausreichend ist.

3.2.5 Tightly Coupled GNSS/INS

Ein auf Satelliten-Navigation (*Global Navigation Satellite System* – GNSS) und Inertialsensorik (*Inertial Navigation System* – INS) basierter Lokalisierungsansatz des Ko-PER Projekts stellt der Tightly Coupled GNSS/INS (TCS) Ansatz dar. Dieser Ansatz untersucht die direkte Verarbeitung der vom GNSS Empfänger gewonnenen Rohdaten in der Lokalisierungsfusion. Der TCS Ansatz wurde im Rahmen des Teilarbeitspaketes 2.650 vom Projektpartner ITE bearbeitet und im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung ausgewertet. Die Ergebnisse der TCS Lösung wurden zur Initialisierung und Stützung der oben beschriebenen Landmarken-basierten Verfahren eingesetzt.

3.2.5.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des Ko-PER Projekts wurde ein Konzept für das TCS System erarbeitet und die Anforderungen an einen geeigneten Rohdaten GNSS Empfänger spezifiziert. Im Anschluss hat wurde am ITE das Hardwarekonzept erarbeitet, die Systemkomponenten akquiriert und zu einem Gesamtsystem integriert. Die Entwicklung der Algorithmen fand auf dem erstellten System statt, das in die Versuchsträger der Fahrzeugbetreiber integriert wurde. Für den Datenaustausch mit den Fahrzeugrechnern wurde eine Kommunikationsbibliothek implementiert und eingebunden. Das System wurde zur Evaluierung zum einen am ITE untersucht, zum anderen wurden die TCS Lokalisierungslösung in den Versuchsträgern der Fahrzeugbetreiberschritthaltend aufgezeichnet und anschließend mit den ebenfalls aufgezeichneten Ergebnissen eines *High-End* Referenzsystems verglichen.

3.2.5.1.1 Konzeptionierung (TAP 2.650-1)

Das *Tightly Coupled GNSS/INS* Verfahren liefert eine von der lokalen Infrastruktur unabhängige, „absolute“, d.h. georeferenzierte Fahrzeug-Eigenlokalisierung in Echtzeit. Die Lokalisierungslösung beinhaltet sowohl die 3D Position des Fahrzeugs (geographische Länge, Breite und Höhe), als auch dessen Geschwindigkeit und Orientierung und erfordert kein Vorwissen über die lokale Umgebung.

Das System fusioniert Sensorinformationen einer Inertialmesseinheit (IMU), d.h. drei Drehraten und drei Beschleunigungskomponenten mit denen eines Globalen Navigationssatellitensystems (GNSS), im vorliegenden Fall die des amerikanischen *Global Positioning System* (GPS).

Die Datenfusion mit den inertialen Messdaten gestattet es, Informationsausfälle, wie sie bei einer rein GNSS basierten Navigationslösung bei Verfügbarkeit von weniger als vier sichtbaren Satelliten auftreten, zu überbrücken und außerdem, signifikant höhere Dynamiken abzubilden.

In Erweiterung des klassischen Loosely-Coupled GNSS/INS Ansatzes, bei dem die bereits ermittelten georeferenzierten GNSS Positionen und Geschwindigkeiten zur Fusion herangezogen werden, fusioniert der Tightly Coupled Ansatz die inertialen Messgrößen mit den GNSS-Rohdaten eines jeden einzelnen Satelliten, wie beispielsweise die sogenannte Pseudorange (fehlerbehaftete Abstandsmessung zum Satelliten). Der TCS Ansatz erlaubt, wie schon erwähnt, eine Stützung der INS-Lokalisierung mit GNSS auch bei weniger als 4 sicht-

baren Satelliten. Damit erhöht sich in Szenarien mit wenigen Satelliten die Verfügbarkeit des Systems. Des Weiteren kann das System die individuelle Gewichtung der Einzelnen Satelliten bei der Fusion direkt steuern und vermeidet überdies eine Kaskadierung mehrerer hintereinander geschalteter Kalman Filter.

Als Propagationsmodell wird ein kinematisches Bewegungsmodell mit sechs Freiheitsgraden zu Grunde gelegt. Dies ermöglicht die voll dreidimensionale Erfassung der Trajektorie. Die Filterfusion basiert auf einem *Extended Error State* Kalman Filter, der in geschlossener Schleife (*closed loop*) betrieben wird. Der Filter schätzt neben dem Uhrenfehler die Nullpunktfehler der inertialen Beschleunigungs- und Drehratensensoren.

GNSS Referenzmessdaten werden in das System integriert und korrigieren Fehlereinflüsse aufgrund der variablen Signalausbreitung in der Atmosphäre zwischen Satellit und Empfänger. Das erarbeitete Systemkonzept ist in Abbildung 32 schematisch dargestellt.

3.2.5.1.2 Auswahl GNSS Rohdaten Empfänger (µMS 2.650-2)

Der TCS Ansatz basiert auf der direkten Verarbeitung der im GNSS Empfänger registrierten Rohdaten (Beobachtungsgrößen). In die TCS Fusionslösung fließen die empfängerbezogene Pseudorange und die Dopplermessung jedes einzelnen Satelliten ein.

Der in Ko-PER bearbeitete, von TCS unabhängige Lokalisierungsansatz „Kooperative Lokalisierung mit GNSS“ (TAP 2.660) nutzt dagegen die Rohdatenmessungen mehrerer GNSS-Empfänger an den unterschiedlichen Fahrzeug- oder Kreuzungsstandorten.

Für beide Lokalisierungsaufgaben wurde eine gemeinsame Anforderungsliste gemäß Tabelle 11 erstellt, auf Basis derer ein für beide Ansätze geeigneter GNSS Empfängers identifiziert werden konnte. Die wesentliche Anforderung des TCS Ansatzes besteht dabei in einer Wiederholrate größer 1Hz und in der Zugriffsmöglichkeit auf die GNSS-Rohdaten.

Lfd. Nr.	Anforderung (Begriff)	Zahlenwert mit Einheit	Erläuterungen
1	GNSS Empfänger		
1.1	Rohdaten		
1.1.1	Beobachtungsgrößen	-	Codephase, Delta-Range
1.1.2	Wiederholrate Beobachtungsgrößen	10 Hz	
1.1.3	$\Delta t_{\text{Delay, GNSS}}$	<100ms	Maximale Latenz zwischen der Gültigkeit der GNSS Messung und Verfügbarkeit beim Nutzer nach serieller Datenübertragung
1.1.4	Satellitendaten	-	Ephemeriden-Daten
1.1.5	Codephasen-Rauschen	$\sigma = 20\text{cm}$	Gaußsches Rauschen der Codephasen Messung
1.1.6	Qualität Delta-Range-Messung	$\sigma = 0.1\text{m/s}$	Gaußsches Rauschen der Delta-Range-Messung
1.2	Navigationsdaten		
1.2.1	PVT-Lösung	-	3D Position, 3D Geschwindigkeit, GPS-Zeit
1.2.2	Wiederholrate PVT-Lösung	10Hz	
1.2.3	Qualität Positionsmessung	$\sigma = 1.5\text{m}$	
1.2.4	Qualität Geschwindigkeitsmessung	$\sigma = 0.1\text{m/s}$	
1.3	Signalakquisition		
1.3.1	Kaltstart	$\leq 60\text{s}$	Signalverfügbarkeit nach Receiver Kaltstart
1.3.2	Re-Akquisition	$\leq 1\text{s}$	Re-Akquisition nach kurzzeitigem Signalverlust

1.4	Zeitsynchronisation		
1.4.1	PPS	1 Hz	<i>Puls per Second</i> nach GPS-Zeit, TTL-Signal, eigene Leitung
1.4.2	$\Delta t_{\text{Jitter, PPS}}$	$\leq 10 \mu\text{s}$	Maximaler Jitter / Ungenauigkeit PPS
1.5	Datenschnittstellen		
1.5.1	Data-Out	2	Serielle Datenkanäle (RS-232, 57k6 – 230k4)
1.5.2	Protokoll NMEA verfügbar	-	Mit Wiederholrate 1Hz
1.6	Temperaturbereich		
1.6.1	Arbeitsbereich	-40-85°C	
1.7	Stromversorgung		
1.7.1	Spannung	12V	Stabilisierte Spannungsversorgung
1.7.2	Leistungsaufnahme	<10W	
1.8	Schwingungsresistenz		
1.8.1	Vibrationen	30.8m/s ²	Maximaler Effektivwert der Beschleunigung im Vibrationsfall, siehe Anmerkung
1.8.2	Mechanischer Schock	500 m/s ² - 6s	Maximale Spitzenbeschleunigung im Belastungsfall (Schock) über Schockdauer

Tabelle 11: Spezifikation der Anforderungen an den GNSS Rohdatenempfänger für TCS und Kooperative Lokalisierung mit GNSS, Quelle: Ergebnis zu TAP 2.650-2

3.2.5.1.3 Hardware-Aufbau der TCS Systeme und Auslieferung (TAP 2.650-3)

Für den Betrieb des TCS wurden folgende erforderlichen Hardwarekomponenten ausgewählt und akquiriert:

- Navigations-/Fusionsrechner
- GPS Empfänger (Rohdatenempfänger)
- GPS Antenne (mit HF-Kabel)
- *Inertial Measurement Unit* (IMU) – Inertiale Messeinheit
- GSM/GPRS-Modem mit Antenne (inkl. HF-Kabel)

Damit standen folgende Hardwareschnittstellen und Kommunikationsmöglichkeiten zur Verfügung:

- 2x Ethernet zur Datenübertragung der TCS Navigationslösung und Konfiguration des Systems
- 1x RS232 zur Datenübertragung der TCS Navigationslösung
- 1x RS232 zur Datenübertragung spezifischer Ausgaben des GPS Empfängers (z.B. zur kooperativen GPS-Lokalisierung)
- 1x Coax-Anschluss zur Bereitstellung des GPS-PPS-Pulses

Die Kommunikation der TCS Einzelkomponenten untereinander wurde gemäß Abbildung 31 umgesetzt. Die am ITE fertig aufgebauten und getesteten Einheiten wurden den Fahrzeugherstellern zur Integration in die Fahrzeugversuchsträger bereitgestellt.

Es wurden insgesamt sieben TCS-Einheiten aufgebaut. Fünf Einheiten wurden an die Fahrzeugbetreiber ausgeliefert und dort in die jeweiligen Versuchsträger integriert. Eine Einheit stand dem ITE selbst zu Forschungszwecken zur Verfügung. Eine Weitere befand sich als Reserve am ITE.

Die Auslieferung der TCS-Einheiten an die Projektpartner erfolgte gemäß Tabelle 12.

Betreiber	Anzahl TCS
BMW Forschung und Technik GmbH	3
Delphi Electronics & Safety	1
Daimler AG	1
MRM/driveU	1

Tabelle 12: Aufteilung TCS-Einheiten auf Projektpartner und Versuchsträger

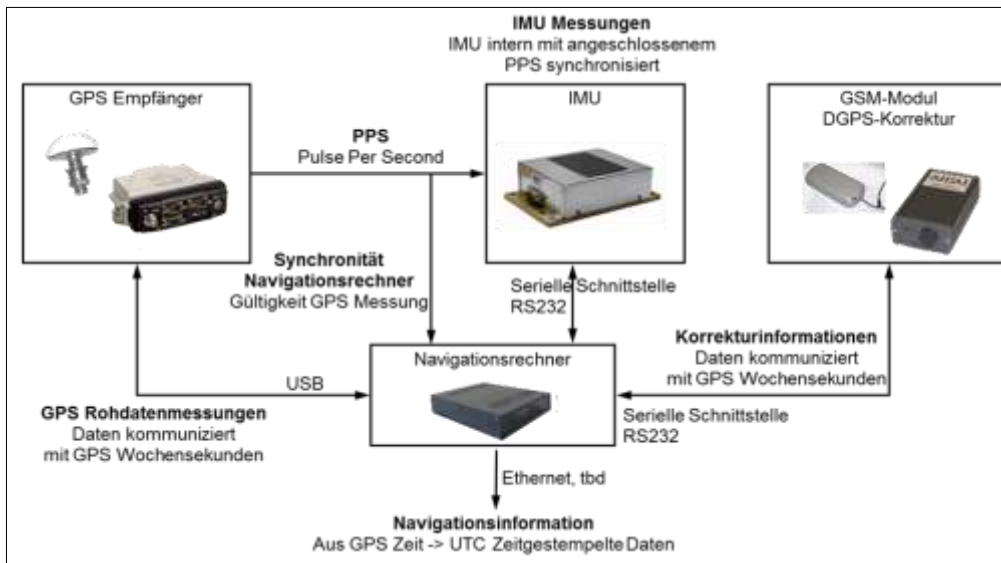


Abbildung 31: Hardwareübersicht TCS

3.2.5.1.4 Algorithmus und Schnittstellen / Implementierung (TAP 2.650-4)

Die Algorithmik und Sensoranbindung wurde auf einer PC Plattform (TCS-Einheit) mit dem Betriebssystem OpenSuse Linux implementiert. Die TCS eigene Sensorik (GNSS Empfänger, Inertiale Messeinheit (IMU), DGNSS Korrekturdatenmodem) ist direkt über native Schnittstellen (seriell, USB) mit der TCS-Einheit verbunden. Die Software Realisierung orientiert sich an dem in aus Abbildung 32 gezeigten Systemkonzept.

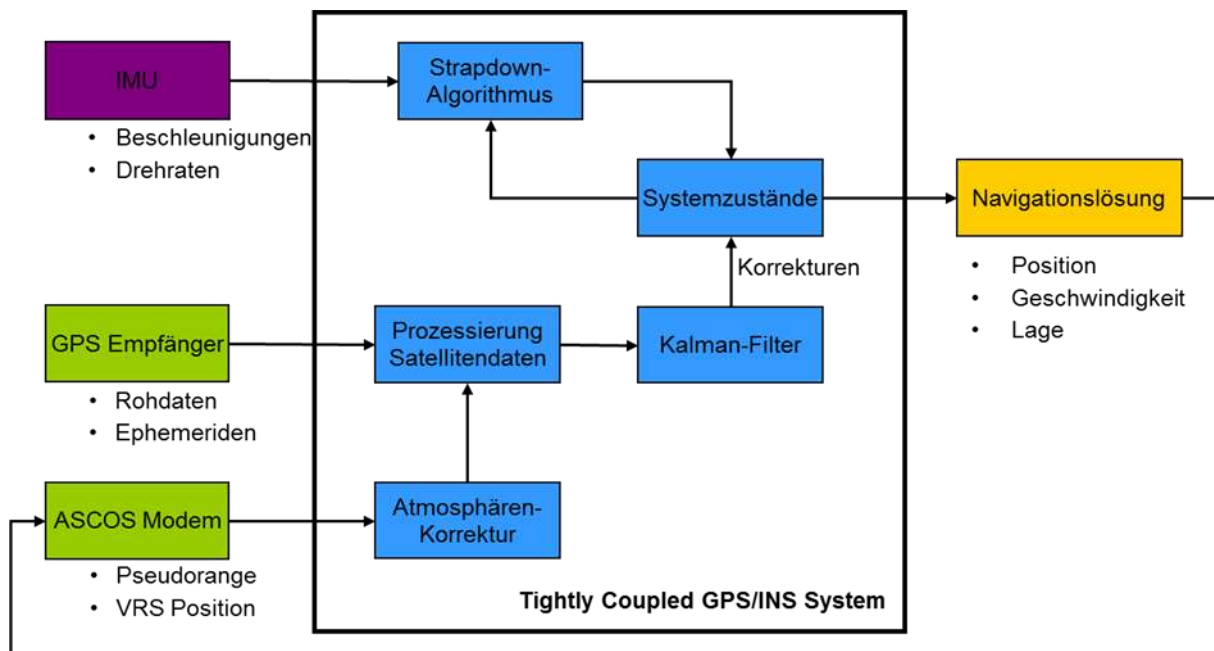


Abbildung 32: TCS Übersicht Systemkonzept

Die Kommunikation mit dem Fahrzeugrechner erfolgt über die Ethernet-Schnittstelle und ein für alle Kooperationspartner identisches Kommunikationsprotokoll. Die Implementierung der Algorithmik erfolgte in der Programmiersprache C++ und ist von keinem proprietären

Framework abhängig. Das System ist modular aufgebaut, sodass die Datenfusion um weitere Sensorinformationen erweiterbar ist.

3.2.5.1.5 System-Evaluierung (TAP 2.650-5)

Das TCS wurde zum einen bei Messfahrten des ITE in Karlsruhe, Alzenau und Aschaffenburg evaluiert. Zum anderen wurden *Online*-Lösungen des Systems von den Fahrzeugbetreibern an deren Standorten (Ulm, Wuppertal, München und Sindelfingen) und der während Messkampagnen 9 bis 11 in Aschaffenburg zur Auswertung aufgezeichnet (Bezeichnung der Messkampagnen gemäß Tabelle 19, Seite 158).

Während der Messfahrten wurden Referenzsysteme (GNSS/INS, bzw. DGNS RTK) zum quantitativen Vergleich mitgeführt. Der Fahrzeugrechner (*Application Unit* (AU)) zeichnete die Lokalisierungslösung des jeweils verwendeten Referenzsystems in einem partnerübergreifend definierten binären Datenformat auf.

Die Online-Navigationslösung des TCS wurde sowohl auf der TCS-Einheit im ITE Format gespeichert als auch an den Fahrzeugrechner übertragen, der die Lösung im partnerunabhängigen Datenformat aufzeichnete. Parallel wurden die TCS Sensordaten auf der TCS-Einheit gesichert, was eine Nachbearbeitung der bei den Messfahrten der akquirierten Daten ermöglichte.

Die Auswertung und Ergebnisse der Machbarkeitsuntersuchungen der TCS Lokalisierung wurden im Zuge der Teilarbeitspakete 2.650-5 und 2.690-5 sowie eines Artikels in der Fachzeitschrift ATZ (Ausgabe Januar 2013) vorgenommen bzw. beschrieben [34].

3.2.5.2 Erzielte Ergebnisse

Zusammenfassend können die Ergebnisse der Machbarkeitsuntersuchung wie folgt charakterisiert werden.

Wie von GNSS basierten Lokalisierungssystemen tendenziell nicht anders zu erwarten, ist die Güte der Lokalisierung signifikant abhängig von den konkret vorliegenden Eigenschaften der Umgebung (Innenstadt, Überland, etc.). Eine geringere Anzahl verfügbarer Satelliten, größere Geometrie bedingte Fehler (Dillusion of Precision) und nicht kompensierbare Mehrwegeausbreitung des GNSS Signals verringern insbesondere in der Innenstadt die Güte der Lokalisierung.

Unter guten Empfangsbedingungen etwa bei freier Überlandfahrt genügen sowohl die longitudinalen als auch lateralen Positionsfehler in aller Regel einer spurgenaue Positionierung. Insbesondere der laterale Positionsfehler vergrößert sich aber im Innenstadtbereich bei dichter Bebauung signifikant. Dies ist vorwiegend auf fahrbahnparallele Bebauungen zurückzuführen, die bei verringerter Satellitensicht Mehrwegeausbreitungen stark begünstigen. Längs der Straße herrschen allerdings in der Regel bessere GNSS Grundbedingungen als quer zur Straße. Die longitudinale Verfügbarkeit liegt auch im Innenstadtbereich in vielen Situationen bei über 80%.

Die Güte der Orientierung (Yaw-Winkel / Gier-Winkel) ist abhängig von der Initialisierung des Systems, der Güte des Drehratensensors und den auftretenden Dynamiken während der Fahrt. Das gewählte kinematische Filter ermöglicht eine Korrektur der horizontalen Orientierung bei einer vorhandenen Dynamik (Querbeschleunigung) des Fahrzeuges. Insbesondere in Innenstädten und an Kreuzungen ist von einer vergleichsweise geringeren Geschwindigkeit und Querdynamik auszugehen. Bei einem initialen Fehler der Orientierung im Grad-Bereich und geringen Dynamiken erfüllt das TCS bei Verwendung des kinematischen Systemmodells die Forderung eines Orientierungsfehlers von weniger als einem Grad in den meisten Fällen nicht. Die Fusion von Odometrie-Informationen könnte hier Verbesserungen erbringen.

Die einzelne Verarbeitung der GNSS Rohdaten erlaubt eine dynamischere Gewichtung der GNSS Messdatensätze. In einigen Fällen kann damit eine positive Stützung auch bei einer geringen Anzahl von weniger als vier sichtbaren Satelliten erreicht werden. Es treten aller-

dings Szenarien auf, in denen einzelne vom GNSS-Empfänger gelieferte Satellitenmessungen stark Fehler behaftet sind, und deren Verwendung einen ausgeprägt negativen Einfluss auf die Güte der Lokalisierungslösung hat. Entscheidend sind die tatsächliche Güte der Messung und deren Gewichtung. In einigen Fällen sind für das TCS bestimmte Satelliten kurzzeitig abwechselnd verfügbar und wieder nicht verfügbar.

Einen Totalausfall der GNSS Signale, wie er typischerweise bei Tunnelfahrten auftritt, kann das System über einige wenige Sekunden kompensieren wobei allerdings signifikante Drifts auftreten können. Abhängig von der Güte der folgenden GNSS Messungen wird der Fehler nach Wiederverfügbarkeit der Satellitensicht auf das zuvor vorherrschende Niveau korrigiert. Bei geringen Querdynamiken wird jedoch insbesondere die Position besser korrigiert als die Orientierung. Für den verwendeten Receiver ist bei der Wiederverfügbarkeit der Rohdatenmessungen nach Verlust und Wiedergewinnung der Satellitensicht (Tunnel Ein- und Ausfahrt) eine gewisse Latenzzeit festzustellen.

3.2.6 Kooperative Lokalisierung

Die kooperative Lokalisierung ist ein Ansatz, bei dem sich verschiedene fahrzeug- oder kreuzungsgebundene GNSS- bzw. Kommunikationseinheiten relativ zueinander orten. Das Verfahren basiert auf dem Austausch von GNSS Rohdaten (wie z.B. PRN, Pseudorange und Signalstärke) zwischen den Ko-PER Stationen. Eine Ko-PER Station kann sowohl ein Fahrzeug als auch eine Infrastruktureinheit (beispielsweise eine Kreuzung) sein. Für die kooperative Lokalisierung wird die sog. *Cooperative Localization Message* (CLM) zwischen den Fahrzeugen in Kommunikationsreichweite ausgetauscht. Die GNSS Rohdaten werden vom *Tightly Coupled System* (TCS) zur Verfügung gestellt. Bei Systemen ohne TCS wird ein baugleicher Receiver zur Generierung der CLM genutzt. Das Ergebnis der kooperativen Lokalisierung ist ein Relativvektor, der von der TCS-Antennen-Position des lokalen Fahrzeugs zur TCS-Antennen-Position der kooperierenden Ko-PER Station zeigt. Mit Hilfe der Relativvektoren kann eine relative Ortung der kooperierenden Ko-PER Stationen durchgeführt werden, wobei der Ursprung des Koordinatensystems mit dem lokalen Fahrzeug verbunden ist. In Abbildung 33 ist ein Relativvektor (blauer Pfeil) zwischen dem lokalisierendem und dem lokalisierten Fahrzeug dargestellt.

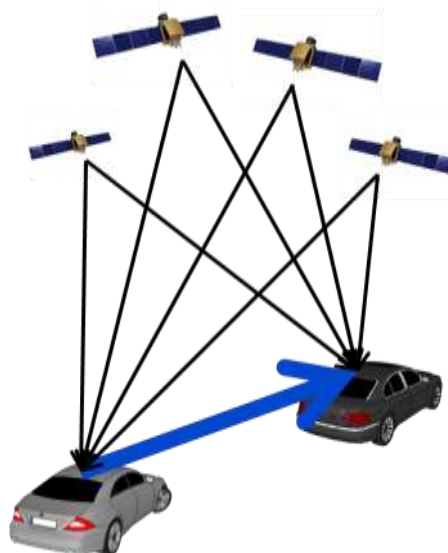


Abbildung 33: Relativvektor zwischen zwei Fahrzeugen.

Für die Datenerhebung und Systemerprobung wurden das Delphi-Versuchsfahrzeug als Applikationsträger und die Versuchsträger von Daimler (Sindelfingen) und MRM (driveU) sowie die Kreuzung in Aschaffenburg als CLM-generierende Systeme genutzt.

3.2.6.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

3.2.6.1.1 Implementierung

In Abbildung 34 ist am Beispiel des Delphi-Versuchsträgers eine Übersicht der Hardware dargestellt, die für die kooperative Lokalisierung verwendet wird. Das TCS stellt sowohl GNSS Rohdaten als auch eine mit dem TCS Algorithmus geschätzte Navigationslösung zusätzlich der IMU Rohdaten zur Verfügung. Die CCU ist für das Senden und Empfangen von Nachrichten zuständig. Zur Bereitstellung einer UTC-synchronen Zeitbasis zur Datenaufzeichnung werden im Delphi-Versuchsträger die Zeitstempel der so genannten SyncBox benutzt. Das RTK Referenzsystem liefert hochgenaue Positionsdaten, welche für die Evaluierung des Lokalisierungsansatzes verwendet werden. Als Referenzdaten werden auch die Geschwindigkeit und die Gier-Rate vom CAN-Bus abgefragt. Die einzelnen Hardware-Module sind mit dem Fahrzeugrechner, der sog. *Application Unit (AU)*, verbunden. Auf der AU werden die Daten der Lokalisierungslösung genutzt.

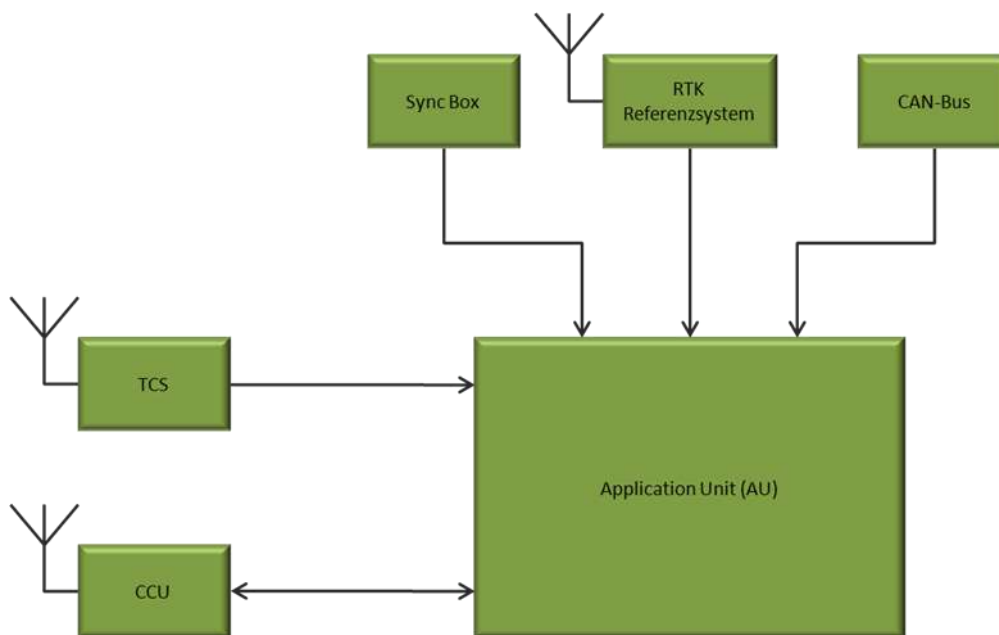


Abbildung 34: Hardware für die kooperative Lokalisierung.

In der Lokalisierungs-Software werden verschiedene Nachrichtentypen erstellt. Hierzu gehören die CLM, REF und MREF Nachrichten. Die CLM enthält die GNSS Rohdaten, die für den Lokalisierungsansatz erforderlich sind. In der REF-Nachricht sind die Referenzdaten des RTK Referenzsystems und einige Daten vom CAN-Bus enthalten, die für die Evaluierung des Lokalisierungsansatzes genutzt werden. In der MREF sind zusätzliche Informationen des Referenzsystems abgelegt. Der Algorithmus zur kooperativen Lokalisierung berechnet für jede empfangene CLM einen Relativvektor zwischen der lokalen TCS-Antenne und der TCS-Antenne der kooperierenden Ko-PER Station im ECEF-Koordinatensystem. Neben den empfangenen CLMs für einen Zeitschritt benötigt der Algorithmus hierfür auch die lokale CLM mit demselben Zeitstempel. Für die Berechnung der Relativvektoren werden auch die Satelliten Orbit-Informationen benötigt, die in regelmäßigen Zeitabständen von den GPS-Satelliten gesendet werden.

3.2.6.1.2 Auswertung

Die Evaluierung des Systems zur kooperativen Lokalisierung wurde mit Hilfe der Ko-PER Station an der Kreuzung in Aschaffenburg durchgeführt. Für eine einheitliche Evaluierung aller im Projekt eingesetzten Methoden müssen die Lokalisierungsergebnisse in LLH-Koordinaten (*Longitude, Latitude, Height*), bezogen auf den Ko-PER-Bezugspunkt, vorliegen.

Der Ko-PER-Bezugspunkt ist die Projektion der Tangentenmitte des vorderen Stoßfängers auf die Fahrbahnebene.

In Abbildung 35 ist die Vorgehensweise zur Evaluierung dargestellt. Der grüne Pfeil beschreibt den Hebelarm zwischen dem Bezugspunkt der Kreuzung (Punkt A) und der TCS-Antenne an der Kreuzung (Punkt B). Die Position der TCS-Antenne an der Kreuzung ist über den Hebelarm mit einer Genauigkeit von 10 cm bekannt. Der blaue Pfeil beschreibt den negativen (umgekehrten) Relativvektor, der von der TCS-Antenne an der Kreuzung zur TCS-Antenne im Fahrzeug (Punkt C) zeigt. Über den orangenen Pfeil wird die Koordinatentransformation auf den Ko-PER-Bezugspunkt im Fahrzeug (Punkt D) dargestellt. Der Fehler (Punkt E) zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Position der TCS-Antenne im Fahrzeug wird durch den roten Pfeil modelliert. Dieser Fehler wird mit Hilfe des RTK-Referenzsystems ermittelt.

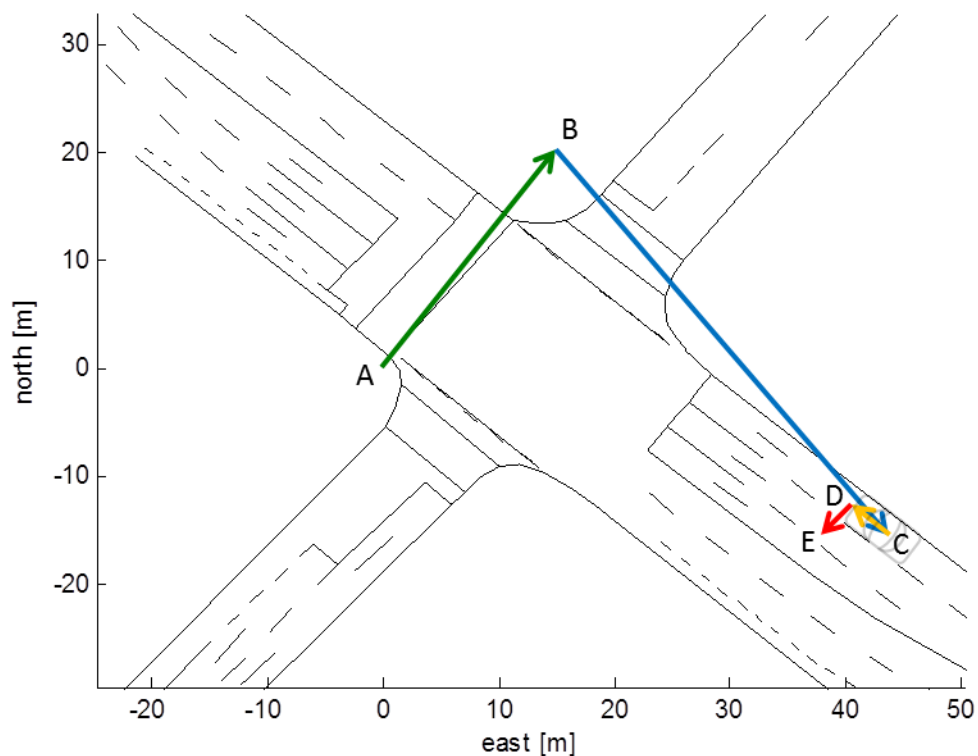


Abbildung 35: Funktionsweise der Evaluierung.

Der Algorithmus zur kooperativen Lokalisierung berechnet für jede empfangene CLM einen Relativvektor zu der kooperierenden Ko-PER Station. Die Orientierung der kooperierenden Ko-PER Stationen wird in der aktuellen Implementierung nicht ermittelt. Aus diesem Grund wird die Orientierung für diesen Lokalisierungsansatz nicht ausgewertet. Für die Evaluierung wurde die Orientierungslösung des TCS benutzt.

3.2.6.2 Erzielte Ergebnisse

Für die kooperative Lokalisierung wurden zwei Szenarien untersucht. Im ersten Szenario fahren die Fahrzeuge geradeaus durch die Kreuzung. Im zweiten Szenario biegen die Fahrzeuge an der Kreuzung ab. Für beide Tests wird ein Abschnitt der Ergebnisse an der Kreuzung erläutert. Die Kreuzung wird in den folgenden Abbildungen mit Hilfe der digitalen Karte dargestellt, die im Rahmen von Ko-PER vom Projektpartner SICK erstellt wurde.

3.2.6.2.1 Test 1

Bei diesem Test fahren die Fahrzeuge geradeaus durch die Kreuzung. Die CLMs von der Ko-PER Station an der Kreuzung wurden ab einer Entfernung von 850 m empfangen (Betrag des Relativvektors). In Abbildung 36 ist ein Ausschnitt der Ergebnisse an der Kreuzung dargestellt. Die grünen Punkte beschreiben die absoluten GPS-Positionen, die mit Hilfe der Relativvektoren berechnet wurden. Der Fehler in den Relativvektoren wird als Abweichung vom Fahrtverlauf dargestellt. Die Fahrt verläuft von rechts unten nach links oben. Unmittelbar vor der Kreuzung befinden sich die gemessenen Positionen genau in der Spur. Hinter der Kreuzung gibt es eine kleine Abweichung. Aus den bisherigen Ergebnissen wurde beobachtet, dass die Abweichungen zu Zeitpunkten entstehen, bei denen sich die Anzahl der gemeinsamen Satelliten zwischen den kooperierenden Ko-PER Stationen verändert. Die Genauigkeit der Positionierung im gezeigten Abschnitt liegt bei diesem Test bei etwa 0,5 bis 2 m. Mit zunehmender Entfernung zur Kreuzung steigt der Fehler an einigen Stellen auf bis zu 5 m an. Die genauen Fehlerursachen sind noch Gegenstand weiterer Untersuchungen. Die Anzahl der gemeinsamen Satelliten schwankte in diesem Test zwischen den Werten 4 und 8.

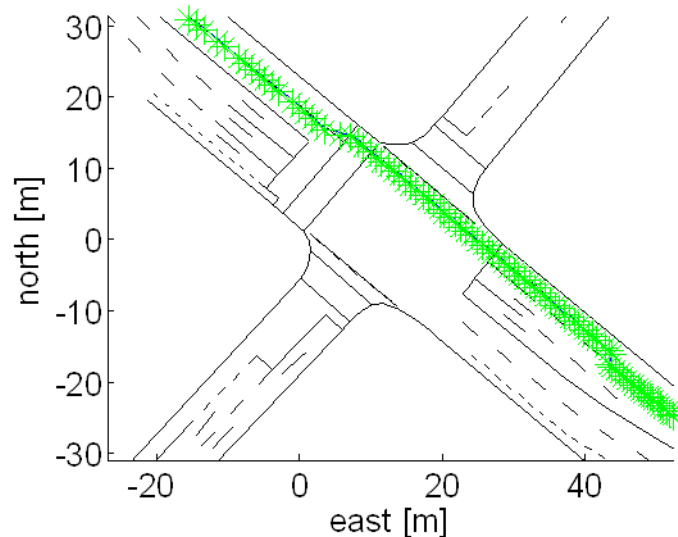


Abbildung 36: Ergebnisse an der Kreuzung (Test 1).

3.2.6.2.2 Test 2

Bei diesem Test sind die Fahrzeuge an der Kreuzung abgebogen. In Abbildung 37 ist ein Ausschnitt der Ergebnisse an der Kreuzung dargestellt. Die Fahrt verläuft von links oben nach links unten. Die gemessenen Positionen decken sich recht genau mit der Mitte des Fahrstreifens. Die Genauigkeit der Positionierung im gezeigten Abschnitt liegt bei diesem Test bei etwa 0,5 bis 1 m. Lücken im Fahrtverlauf weisen darauf hin, dass die Anzahl der gemeinsamen Satelliten zwischen den kooperierenden Ko-PER Stationen zeitweise unter den Wert 4 gefallen ist. In diesem Fall werden von der kooperativen Lokalisierung in der aktuellen Implementierung keine Relativvektoren berechnet. Mit zunehmender Entfernung zur Kreuzung steigt der Fehler an einigen Stellen auf bis zu 5 m an. Die Anzahl der gemeinsamen Satelliten schwankte in diesem Test zwischen den Werten 4 und 8.

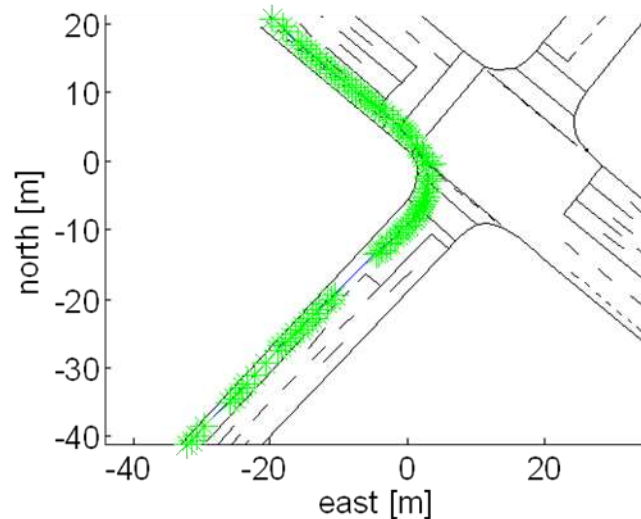


Abbildung 37: Ergebnisse an der Kreuzung (Test 2).

3.2.6.3 Fazit und Ausblick

Mit Hilfe der beiden Tests konnte gezeigt werden, dass der Lokalisierungsansatz grundsätzlich funktioniert. Im unmittelbaren Kreuzungsbereich konnten Genauigkeiten von etwa 0,5 bis 2 m erreicht werden. Mit zunehmender Entfernung zur Kreuzung steigt der Fehler an einigen Stellen auf etwa 5 m an. Es wurden kleinere Abweichungen der Position beobachtet, wenn sich die Anzahl der gemeinsamen Satelliten zwischen den kooperierenden Ko-PER Stationen verändert. Zur Berechnung der Relativvektoren werden in der aktuellen Implementierung mindestens vier gemeinsame Satelliten benötigt. An einigen Stellen wurde die minimale Anzahl der benötigten Satelliten nicht erreicht, so dass an diesen Stellen keine Relativvektoren berechnet werden konnten.

Es wird ergänzend darauf hingewiesen, dass an dem implementierten Algorithmus noch keinerlei Optimierungen vorgenommen wurden. Implementiert und erprobt wurde lediglich das Basisverfahren, bei dem die Pseudorange-Doppeldifferenzen unter Verwendung eines Least-Square-Verfahrens berechnet werden. Es existieren zahlreiche Modifikationsmöglichkeiten, um die Genauigkeit und Robustheit des Lokalisierungsansatzes zu verbessern. Ausgehend von den bisherigen Ergebnissen wurde beobachtet, dass sich die Positionierungsgenauigkeit in einigen Fällen verbessert, wenn die Anzahl der gemeinsamen Satelliten sinkt. Die Ursache dieses Effekts wird derzeit noch untersucht. Es wird angenommen, dass der beschriebene Effekt zu einem großen Anteil aufgrund von Mehrwegausbreitungen (Multipath-Effekte) der Satellitensignale verursacht wird. Neben der Verwendung der gemeinsamen Satelliten könnte beispielsweise Vorgaben definiert werden, um die Anzahl der gemeinsamen Satelliten einzuschränken. Eine weitere Modifikationsmöglichkeit wäre die Gewichtung der verwendeten Pseudorange-Messungen. Auf diese Weise müsste keine Filterung der gemeinsamen Satelliten durchgeführt werden. Zudem könnte eine Datenfusion mit weiteren Fahrzeugdaten durchgeführt werden, um die Robustheit des Lokalisierungsansatzes zu erhöhen. Eine Verbesserung der Genauigkeit und der Robustheit kann auch durch Kombination mit anderen bereits bestehenden Verfahren erzielt werden.

3.2.7 Lokalisierung mit aktiven Ko-TAG Transpondern (TAP 2.670)

Bereits bei der Konzeption der Arbeiten zu Ko-PER war klar, dass eine fahrstreifengenaue Fahrzeug-Eigenlokalisierung von grundlegender Bedeutung für den Erfolg des Projektes sein würde. Angeregt durch Fortschritte in der Entwicklung aktiver Transponder zum Fußgängerschutz im Förderprojekt AMULETT entstand die Idee, die mittels ortsfest verbauter Transponder gewonnenen relativen Positionsbestimmungen zur georeferenzierten Eigenlokalisierung

zung von Fahrzeugen etwa im Bereich von Kreuzungen zu nutzen. Es lag daher nahe, das Potenzial eines derartigen Ansatzes durch Kooperation mit dem Ko-FAS Schwesterprojekt Ko-TAG zu eruieren. Im vorliegenden Abschnitt 3.2.7 wird über entsprechende Untersuchungen berichtet.

3.2.7.1 Lokalisierung mittels Ko-TAG 1.0

3.2.7.1.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

3.2.7.1.1.1 Funktionsprinzip und Aufbau des Systems

Die Eigenlokalisierung mittels Transpondern der Generation Ko-TAG 1.0 basiert auf der Verwendung reiner Entfernungsmessungen nach dem Round Trip Time of Flight (RTOF) Verfahren. Mit dem Ko-TAG 1.0 System ist es möglich, den Abstand eines Master-TAGs zu einzelnen *Roadside*-TAGs mit einer Standardabweichung von 4,7 cm zu ermitteln. Setzt man voraus, dass die exakte geographische Position der *Roadside*-TAGs bekannt ist, kann mittels Laterationsansatz unter Verwendung von mindestens drei Abständen die Position des Master-TAGs erfolgen. Als Ergebnis aus diesem Lokalisierungsansatz erhält man die Längen und Breitengrade-Koordinaten des Master-TAGs. Mittels nachgeschalteter Datenverarbeitung kann zusätzlich die Geschwindigkeit des Master-TAGs und dessen Orientierung geschätzt werden.

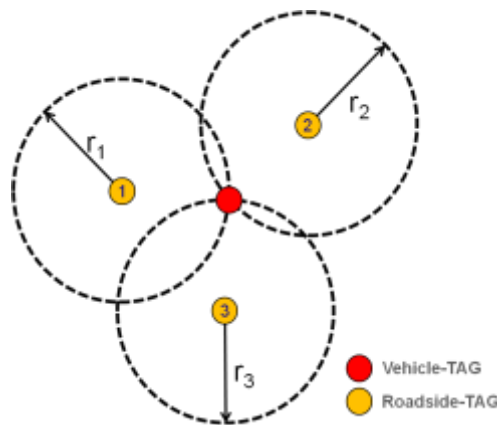


Abbildung 38: Funktionsprinzip der Trilateration

Die *Onboard*-Einheit des Versuchsträgers ist mit einem OBU-TAG der Generation Ko-TAG 1.0 ausgestattet. Dieses ist mit einer omnidirektionalen Sende-/Empfangsantenne ausgestattet, welche vertikal einen schmalen Öffnungswinkel aufweist, um Mehrwegeeffekte wie bspw. Reflektionen über die Motorhaube eines Fahrzeugs zu reduzieren.

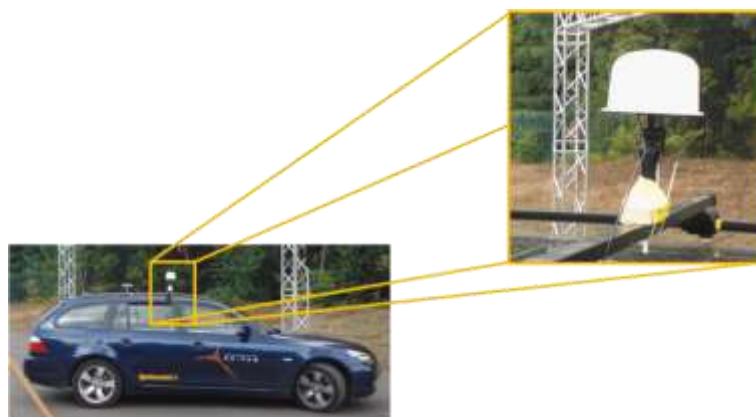


Abbildung 39: Antenne der *Onboard Unit*

Die straßenseitig aufgestellten Transponder, im Folgenden Roadside-TAGs genannt, sind mit einem so genannten *Diversity Switch* ausgestattet, welcher den abwechselnden Betrieb zweier Antennen an einem TAG zulässt. Dies hat zur Folge, dass pro TAG zwei IDs vergeben werden. Die hierfür verwendeten Antennen weisen eine Richtcharakteristik von ca. 180° auf, um eventuelle Mehrwegreflexionen an Objekten hinter den RoadSide-TAGs auf ein Minimum zu reduzieren. Der Reduktion dieser Mehrwege-Effekte dient auch die Ausführung der TAG-Befestigungen aus Holz, welche eine Antennen-Montagehöhe zwischen 2,5m und 4,0m über dem Testfeld ermöglichen.



Abbildung 40: Roadside-TAG mit Holzstativ

3.2.7.1.1.2 Datenverarbeitungsschritte

Die Verarbeitung der Rohdaten gliedert sich in drei Schritte. Das so genannte Preprocessing hat die Aufgabe, die Entfernungsmessdaten auf Plausibilität und Qualität zu prüfen. Weiterhin wird die Einbauhöhe der Roadside-TAGs rechnerisch korrigiert.

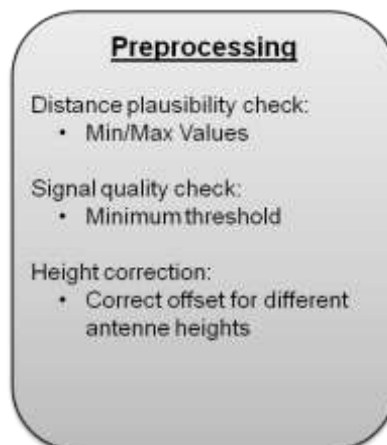


Abbildung 41: Arbeitsschritt Vorverarbeitung

Dies ist notwendig, da schlechte oder nicht plausible Daten zu einer Verfälschung der Positionsberechnung führen würden.

Nach der Vorverarbeitung wird die eigentliche Positionsberechnung durchgeführt. Hierbei bedient man sich, wie bereits erwähnt, des Verfahrens der Trilateration. Aufgrund der großen Anzahl an Roadside-TAGs ist das hierfür verwendete Gleichungssystem aber zumeist überbestimmt, weswegen die bestmögliche Lösung mittels der Methode der Summe der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt wird.

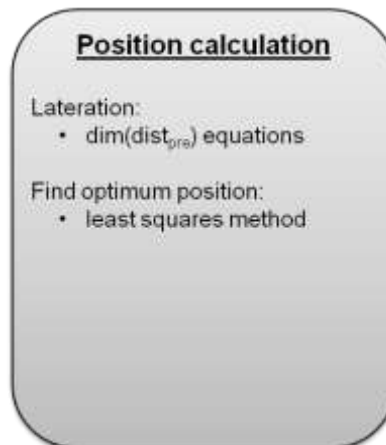


Abbildung 42: Arbeitsschritt Positionsberechnung

Die aus der Positionsberechnung resultierenden Rohpositionen weisen noch ein gewisses Rauschen auf, welche mittels eines Extended Kalman Filters geglättet wird. Neben der Glättung hat dieses Vorgehen den Vorteil, dass die Position trotz kurzzeitiger Messaussetzer stets prädiziert werden kann. Weiterhin ist man mittels des Kalman-Filters in der Lage, verschiedene Zustandsgrößen abzuleiten, die nicht direkt gemessen werden können. In der hier beschriebenen Anwendung wird dies genutzt, um die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs zu schätzen. Dem Kalman Filter basiert hierbei auf dem Modell konstanter Geschwindigkeit. Dies entspricht der Annahme, dass sich die Geschwindigkeit eines Objekts zwischen zwei Zeitschritten nicht verändert. Eventuelle Geschwindigkeitsänderungen werden als Rauschterm modelliert.

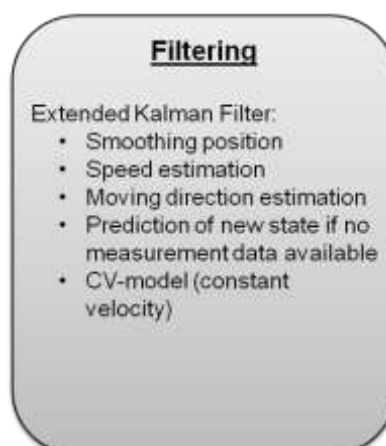


Abbildung 43: Arbeitsschritt *Filtering*

Erst nach dem Filterschritt liegen die Zustandsdaten in der für den Einsatzzweck ausreichender Qualität vor.

3.2.7.1.2 Erzielte Ergebnisse

Das System wurde auf einem ehemaligen Flugfeld in Aschaffenburg-Nilkheim getestet. Hierzu wurden acht *Roadside*-Units rund um das Testfeld platziert und deren Position mittels RTK-DGPS vermessen. Das Testfahrzeug wurde mit einem *Onboard* Sende- und Empfangseinheit ausgestattet. Als Referenzsystem kam ein RTK-DGPS System zu Einsatz.



Abbildung 44: Testfeld in Aschaffenburg-Nilkheim



Abbildung 45: Test-Anordnung in Aschaffenburg-Nilkheim

Die untersuchte Geradeausfahrt lieferte folgende in Abbildung 46 bis Abbildung 48 dargestellten Ergebnisse:

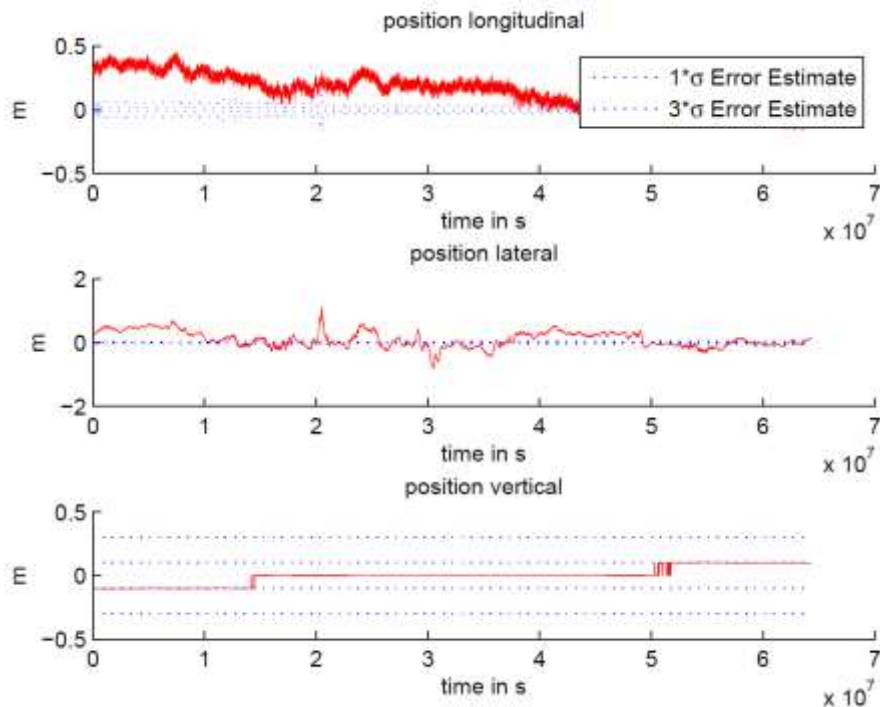


Abbildung 46: Laterale, longitudinale und vertikale Abweichung der Ko-TAG 1.0 Eigenlokalisierung von der Position des Referenzsystems

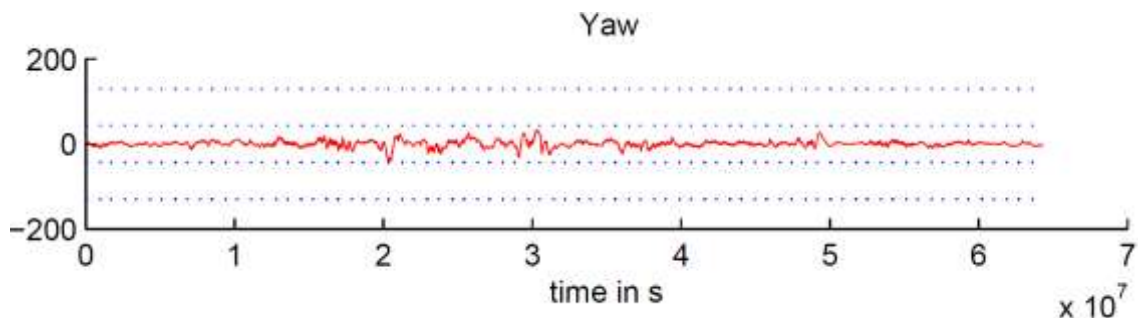


Abbildung 47: Orientierungsabweichung der Ko-TAG 1.0 Eigenlokalisierung zum Referenzsystem [°]

Legt man als Gütekriterium zu Grunde, dass die laterale Abweichung maximal 1 m, die longitudinale Abweichung maximal 2 m und die Orientierungsabweichung maximal $\pi/180$ rad (1°) betragen darf, ist aus Abbildung 48, unten zu erkennen, dass die geforderte Orientierungsgenauigkeit von 1° zu einem hohen Prozentsatz *nicht* erzielt wird. Weiterhin zeigt sich aus Abbildung 48, dass die Positionsbestimmung im untersuchten Szenario nahezu immer die geforderte Genauigkeit erreicht.

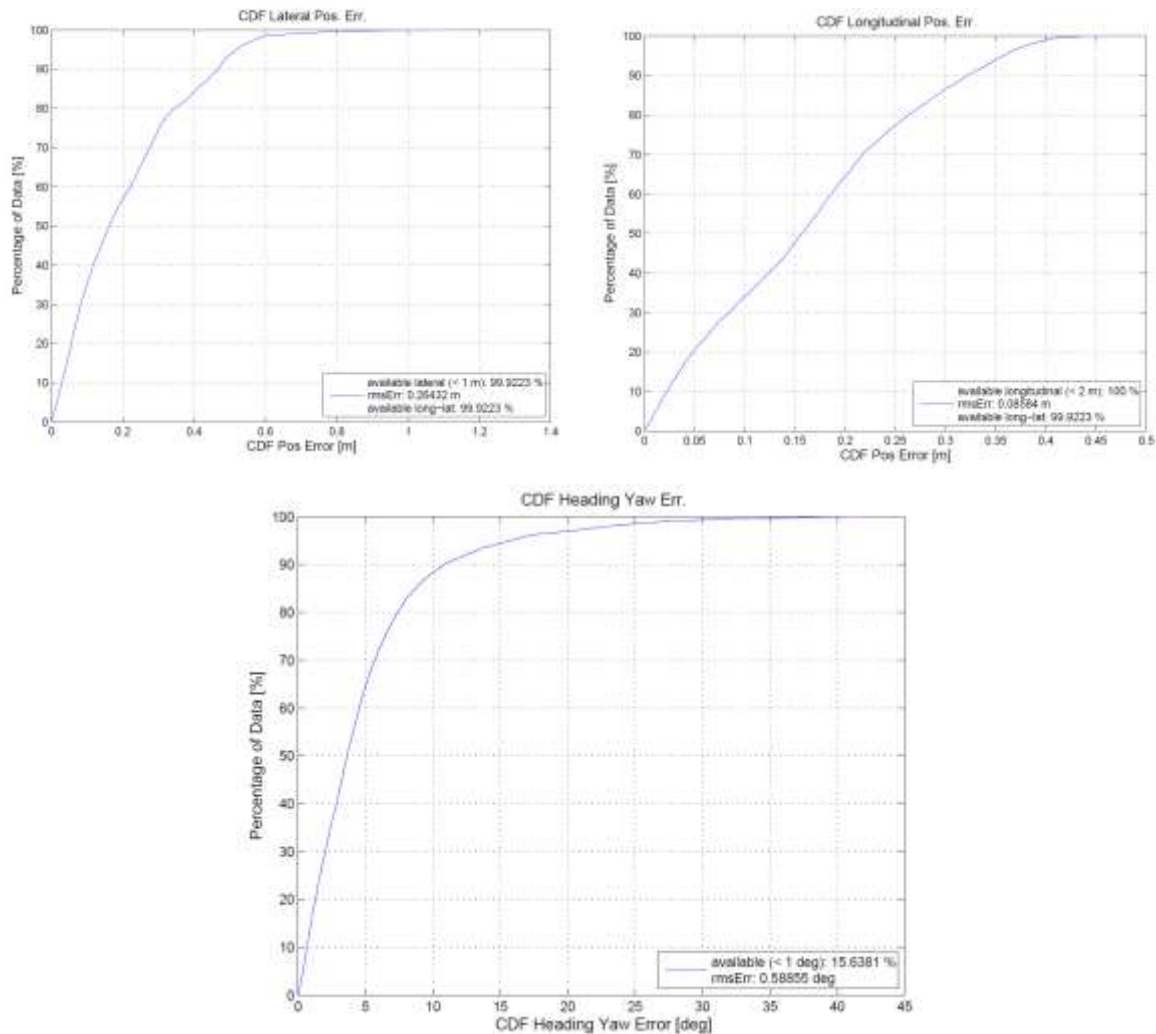


Abbildung 48: Verfügbarkeit der Ko-TAG 1.0 Eigenlokalisierung in lateraler (links), longitudinaler (rechts) Richtung sowie der Orientierung (unten)

3.2.7.2 Lokalisierung mittels Ko-TAG 2.0

Im Gegensatz zur Ko-TAG Version 1.0 findet bei Version 2.0 eine reale Übermittlung von Datenpaketen statt, die den globalen Verbauort der Landmarke (Längengrad und Breitenrad) sowie die Verbauhöhe beinhaltet. Die Gradangaben werden mit einer Auflösung von 32 bit übermittelt, sodass Positionen zentimetergenau repräsentiert werden können. Die Höhe über der Fahrbahnoberfläche wird in einem Bereich von 0...20m mit 2 cm Genauigkeit dargestellt. Damit sind die Fehler der Positionsangaben gegenüber Messfehlern zu vernachlässigen.

Weiterhin steht in Ko-TAG Version 2.0 ein optimierter Qualitätswert zur Verfügung, sodass eine bessere Unterscheidung von Abstandsmessungen mit Line-of-Sight (LOS) im Gegensatz zu Non-Line-of-Sight (NLOS) möglich ist.

Die Erhöhung der Arbeitsfrequenz von 2,4 GHz auf 5,9 GHz bei Ko-TAG 2.0 führt insgesamt zu geringfügig höheren Abweichungen in der Abstands- und Winkelmessung, sodass die Ergebnisse trotz algorithmischer Verbesserungen nicht direkt mit den Genauigkeiten von V1.0 vergleichbar sind. Insbesondere macht sich dieser Effekt bei Verdeckungen bemerkbar, bei denen die Beugungseffekte bei 5,9 GHz gegenüber 2,4 GHz reduziert sind und daher der kürzeste Ausbreitungspfad im Vergleich zu längeren Ausbreitungspfade häufig wesentlich stärker gedämpft wird.

3.2.7.2.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Die Implementierung orientiert sich an der auf der IV 2011 vorgestellten Architektur (*Vehicle localization using cooperative RF-based landmarks*, IV 2011). Es bedarf mindestens zweier kooperativer Landmarken zur initialen Positionsbestimmung. Auf Grund der Abstandsmessungen entstehen zwei mögliche Positionshypothesen (siehe Abbildung 49). Zwischen diesen Hypothesen wird im finalen Algorithmus mittels Winkelmessungen und Plausibilisierung der Fahrdynamik unterschieden. Dazu wird eine Wahrscheinlichkeit auf Basis der Residuen bestimmt.

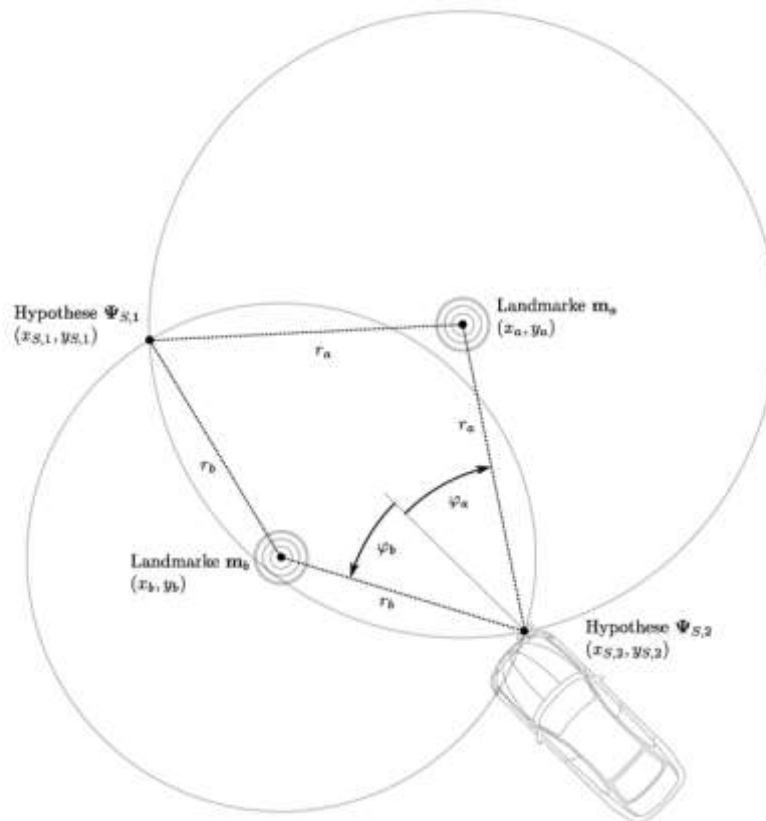


Abbildung 49: Bei der Initialisierung entstehen zwei Positionshypothesen durch die Schnittpunkte der Abstandsmessungen.

An der Aschaffenburger Kreuzung ist von einem projizierten lateralen Abstand der beiden Transponder von 18 m auszugehen; daher beträgt bei einem Abstand von 50 m die Winkeldifferenz zu beiden Transpondern rund 20° . Mit der augenblicklich verfügbaren Winkelgenauigkeit wird selbst in städtischer Umgebung eine Genauigkeit von weniger als $\sigma = 5^\circ$ erreicht, sodass die Winkeldifferenz zwischen den beiden Landmarken mit mehr als 95% Wahrscheinlichkeit positiv ist und die Positionshypothese in diesem Abstand bereits bei der ersten Messung mit ausreichender Konfidenz zu plausibilisieren ist.

Die Initialisierung beider Hypothesen erfolgt, sofern zwei Abstandsmessungen mit hohem Qualitätswert und mindestens eine Winkelmessung der Transponder zur Verfügung stehen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Abstandsmesswerte mittels der LOS gemessen wurden. Ebenfalls zeigt sich ein Zusammenhang, demgemäß geringere Messwertabweichungen bei höheren Qualitätswerten beobachtet werden, sodass ein besserer Initialisierungspunkt zur Verfügung steht. Besonders lange Mehrwegepfade werden bereits dadurch herausgefiltert, dass keine Schnittpunkte zwischen den Abstandsmessungen existieren.

Die Winkelmessung wird genutzt, um die initiale Ausrichtung des Fahrzeugs zu bestimmen. Alternativ ist es möglich, diese aus Kartendaten oder aus der Annahme, dass der Fahrstreifen

fen geradlinig in Richtung des Kreuzungsmittelpunktes zeigt, näherungsweise zu ermitteln. In diesem Fall ist eine Winkelmessung zum Initialisierungszeitpunkt entbehrlich.

Nach der Initialisierung ist auch eine Aktualisierung mit Einzelmessungen jeglicher Teilmengen aus Winkel- und/oder Abstandsmessungen möglich, falls zu diesem Zeitpunkt die Ortung einer Landmarke nicht möglich sein sollte (z.B. auf Grund einer Verdeckung). Dazu wird zu jedem Zeitpunkt geprüft:

- welche Messwerte (Abstandsmessungen, Winkelmessungen) vorliegen;
- ob die Messwerte einer Mindestqualität genügen und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit aus einer LOS-Messung stammen, d.h. geringe Abweichungen aufweisen. (Im Gegensatz zu Erkennung von Fußgängern eignen sich NLOS-Messungen nicht für die Eigenlokalisierung, da diese zu erheblichen lateralen Fehlern führen);
- ob die Messwerte zu einer bestehenden Positionshypothese gehören (dazu wird ein Gate um jede Hypothese gelegt, welches aus der Positionsungenauigkeit und der Messungenauigkeit gebildet wird), sodass Messausreißer oder Mehrwegeausbreitungen keinen Einfluss auf die Positionsbestimmung haben.

Die Zustandskorrektur mit Hilfe von gültigen Messwerten wird mittels eines so genannten *Unscented Kalman Filters* (UKF) vorgenommen. Hierzu werden die experimentell ermittelten Genauigkeiten der Abstands- und Winkelmessungen genutzt.

Aufgrund der Höhendifferenz zwischen Transponder und Ortungseinheit muss eine Umrechnung des Messwertes und dessen Varianz auf die Bewegungsebene des Fahrzeugs erfolgen (siehe Abbildung 50). Diese basiert auf dem Wissen der Verbauhöhe des Transponders aus der Kommunikation und der Position der Ortungseinheit im Fahrzeug. Die Korrektur der Messung des Azimutwinkels ist ebenfalls möglich, wird aber auf Grund der kleinen absoluten Fehler vernachlässigt.

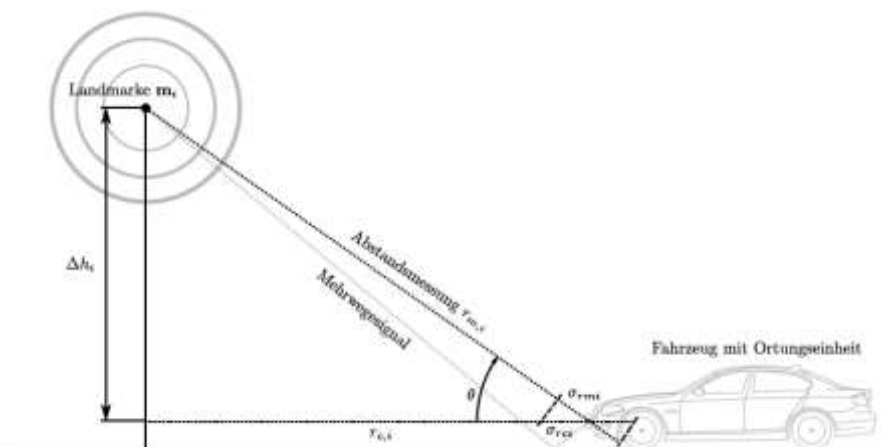


Abbildung 50: Kompensation der Verbauhöhe eines Transponders: Die Höhendifferenz Δh wird aus der Verbauhöhe des Transponders und der Verbauhöhe der Fahrzeugeinheit ermittelt.

Zur Zustandsprädiktion ist es erforderlich, die Position vom Sensorkoordinatensystem auf den Mittelpunkt der Hinterachse zu transformieren, damit der Schwimmwinkel vernachlässigbar ist. Diese Zustandstransformation ist notwendig, um systematische Fehler in Kurvenfahrten bei Nichtberücksichtigung des Schwimmwinkels zu kompensieren (siehe Abbildung 51).

Zur Prädiktion wird das *Constant Turn-Rate and Velocity* (CTRV-) Modell angewendet, bei dem eine näherungsweise konstante Fahrzeug- und Gierwinkelgeschwindigkeit angenommen wird. Das Modell wird durch eine angenommene Varianz der Beschleunigung und Winkelbeschleunigung parametrisiert. Die Parameterwerte wurden experimentell aus Fahrversuchen ermittelt.

Anschließend erfolgt eine Rücktransformation der prädizierten Position zurück in das Sensorkoordinatensystem. Die beiden Koordinatentransformationen hängen stark nichtlinear von der Schätzung des aktuellen Fahrzeug-Gierwinkels ab, der ebenfalls eine geschätzte Größe ist. Da dies zur Inkonsistenz des *Extended Kalman Filters* (EKF) führt, ist der finale Algorithmus mit Hilfe eines UKF ausgeführt. Bei der Implementierung des UKF ist auf die Wahl eines geeigneten Streukoeffizienten α zu achten, da sowohl eine zu hohe als auch eine zu niedrige Streuung der Sigmapunkte zur Inkonsistenz des Filters führt.

Die Verwendung eines Partikelfilters (PF) wurde geprüft, führte jedoch zu keinen signifikanten Verbesserungen gegenüber dem UKF. Es ist jedoch zu erwarten, dass ein Vorteil bei Nutzung von Kartendaten entsteht, da hierbei Partikel ausgeschlossen werden können, die nicht im befahrbaren Bereich liegen. Dieser Ansatz wurde jedoch hier nicht weiter verfolgt.

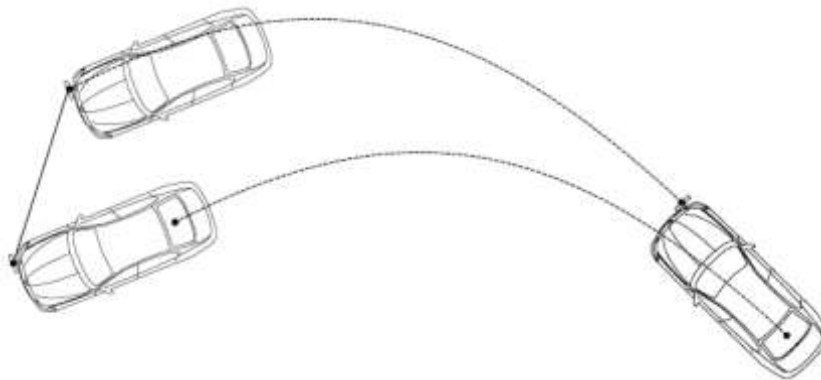


Abbildung 51: Prädiktion im Sensorkoordinatensystem führt zu systematischen Fehlern bei der Prädiktion unter Nutzung des CTRV-Modells und Vernachlässigung des Schwimmwinkels (Prädiktion ohne Rücktransformation: oben, Prädiktion mit Rücktransformation: unten).

Zur Erhöhung der Robustheit sieht der entwickelte Algorithmus einige Mechanismen vor, die den bereits initialisierten Filter wieder in den Anfangszustand versetzen und die Positionshypothese verwerfen; dazu zählen

- die maximale Dauer in der der Filter keine Abstandshypothesen von Transponder 1 und Transponder 2 erhält (erhält der Filter dauerhaft nur Messwerte eines Transponders, führt dies zur Divergenz) sowie
- die Anzahl der Schnittpunkte, die auf Grund der Positionsunsicherheiten nicht einer Positionshypothese zugeordnet werden können. (Die Berechnung der Schnittpunkte ist sehr robust und hilft die Divergenz eines Filters zu erkennen.)

Der so implementierte Filter zeigt sich nach längerer Einschwingzeit als nicht perfekt konsistent. Ursache hierfür ist, dass die Fehler der Abstandsmessungen nicht ideal durch weißes Rauschen beschrieben werden. Dies bedeutet insbesondere, dass die Mittelung über eine große Anzahl von Abstandsmessungen nicht gegen Null konvergiert. Neben Abweichungen aus der Kalibrierung resultiert dieser Fehler aus der Überlagerung von nicht-auflösbaren Mehrwegen mit starker örtlicher Korrelation. Dieser stark örtlich korrelierte Fehler wird durch die Beaufschlagung einer zusätzlichen Kovarianz berücksichtigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass nach einer längeren Mittelung ein mittlerer Abstandsfehler Δr verbleibt. Dieser bestimmt die Positionsgenauigkeit, zu der der Filter nach einer längeren Mittelung ohne den Einfluss von Fahrmanövern konvergiert. Der Parameter Δr wurde experimentell so angepasst, dass eine weitgehend konsistente Lokalisierungslösung ermittelt wird.

Weiterhin entsteht ein systematischer Fehler, sofern die Fläche, auf der sich das Fahrzeug bewegt, nicht ideal eben ist. Tatsächlich weist die Aschaffener Kreuzung eine Steigung von rund 3% in Richtung der Würzburger Straße auf.

3.2.7.2.2 Erzielte Ergebnisse

Die Evaluierung des Filters erfolgte zunächst im Freifeld gemäß der Aschaffener Kreuzungsgeometrie. Die Abbildung zeigt einen typischen Verlauf einer langsamen Fahrt in dieser Geometrie: Dargestellt ist die Trajektorie ermittelt durch eine zentimetergenaue Referenz (blau), die Roh-Schnittpunkte aus den Abstandsmessungen (grün) und das Ergebnis des Lokalisierungsfilters (rot). Ebenfalls sind die Positionen der Landmarken gekennzeichnet.

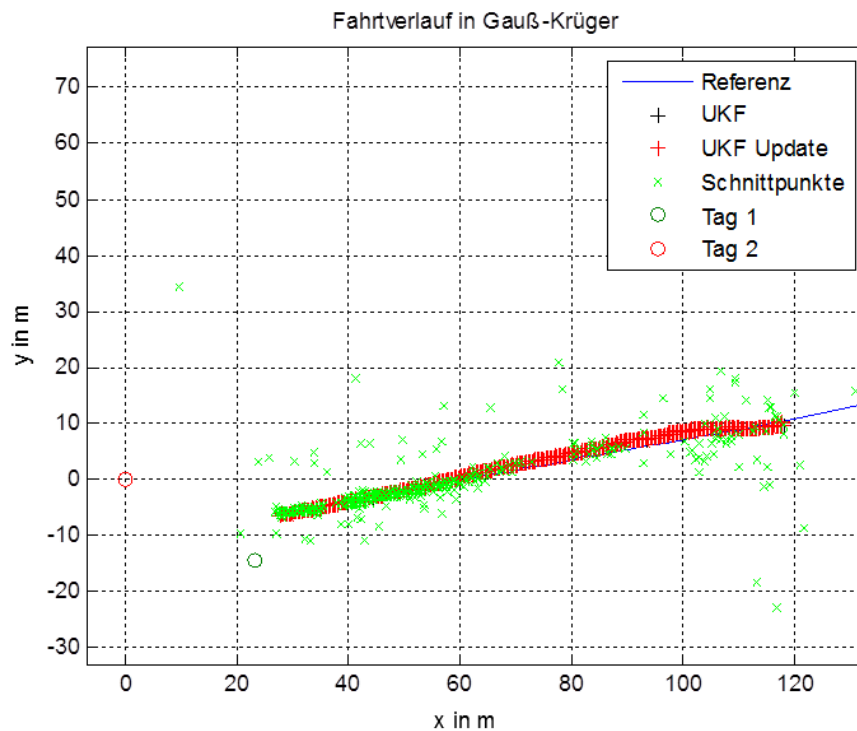


Abbildung 52: Darstellung einer Testfahrt: Referenz, Rohdaten und Ergebnis des Filters.

Die folgenden Abbildungen zeigen *Boxplots* der Abweichungen in lateraler und longitudinaler Richtung sowie in der Ausrichtung für fünf unabhängige Messfahrten mit langsamer Geschwindigkeit in dieser Geometrie. Insofern zeigen die Abbildungen die quasistatischen Fehler, die im Wesentlichen durch die systematischen Messabweichungen bestimmt sind.

Es zeigt sich, dass der longitudinale Fehler über den Abstand zur Kreuzung relativ konstant ist und unterhalb der momentanen Messgenauigkeit von $\sigma_r = 0,5\text{m}$ liegt. Zudem ist für die ausgewerteten Fahrten stets eine sichere Zuordnung des richtigen Fahrstreifens möglich. Die hier sichtbare Tendenz des lateralen Fehlers zu negativen Werten resultiert aus örtlich korrelierten Mehrwegen, die zu systematischen Messabweichungen führen. Der Fehler in der Orientierung der Fahrzeuglängsachse (*Heading-Fehler*) ist wie in der Theorie bei konstanten Messgenauigkeiten nur wenig vom Abstand abhängig und liegt unterhalb von 1° .

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die gleichen Testfahrten bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Durch die stärkere Bewegung des Fahrzeugs werden die Positionsfehler zusätzlich von der Prädiktionsfähigkeit des Fahrzeugmodells beeinflusst. Ebenfalls stehen pro zurückgelegter Längeneinheit weniger Messungen zur Verfügung, sodass vorliegende Fehler weniger stark gemittelt werden. Wie aus diesen Überlegungen zu erwarten, zeigt sich demnach eine leicht erhöhte Streuung der Positionsdaten.

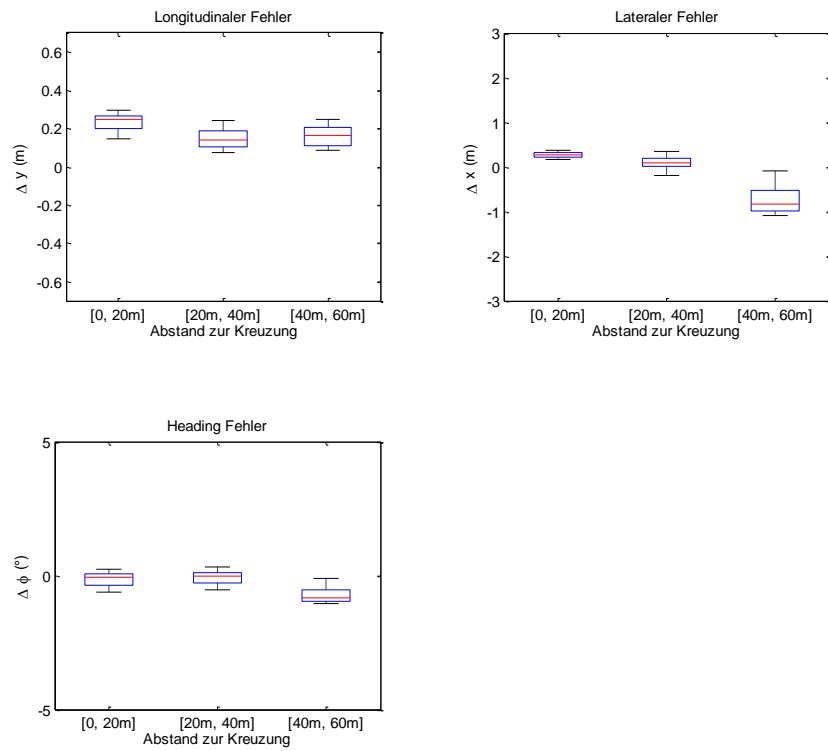


Abbildung 53: Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im *Heading*-Winkel aller Testfahrten unter Verwendung der Aschaffener Kreuzungsgeometrie bei geringer Geschwindigkeit.

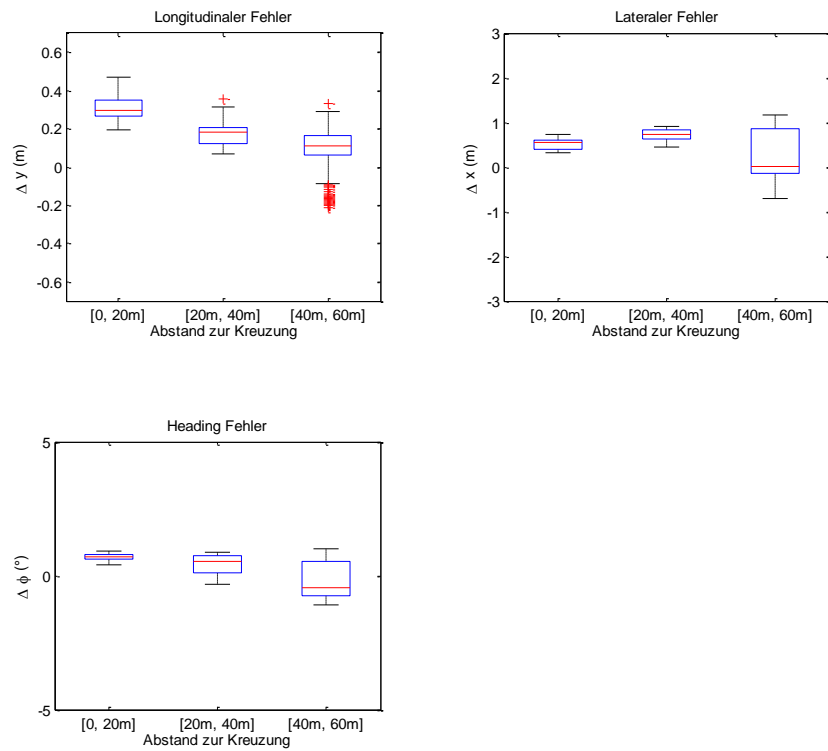


Abbildung 54: Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im *Heading*-Winkel aller Testfahrten unter Verwendung der Aschaffener Kreuzungsgeometrie bei Geschwindigkeiten von ca. 50 km/h.

Die Testfahrten wurden auf der Aschaffener Kreuzung wiederholt. Hierbei treten zusätzliche Fehler auf Grund von stärkeren Mehrwegeüberlagerungen, der nicht exakt linear verlaufenden Steigung und dynamischer Verdeckungen auf.

Um Messungen mit Schrittgeschwindigkeit durchzuführen, wurde eine Messkampagne nachts ohne Verkehr (und damit ohne dynamische Verdeckungen) durchgeführt. Bereits hier zeigt sich eine höhere Streuung der Abstandsmesswerte auf Grund von Mehrwegen, die zu höheren Abweichungen in der Positionsbestimmung führt. Diese Abweichungen sind insbesondere in der lateralen Position und im *Heading*-Winkel zu beobachten. Der longitudinale Fehler zeigt sich dagegen sehr robust gegen die zusätzlichen Abweichungen.

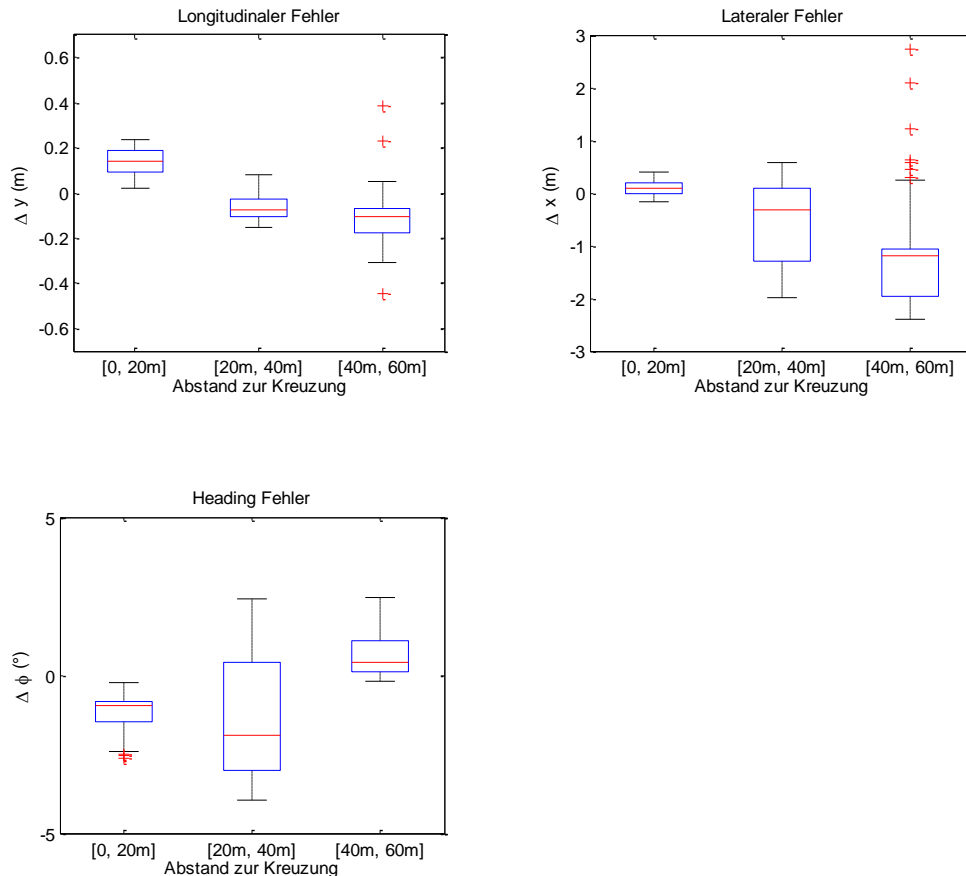


Abbildung 55: Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im *Heading*-Winkel aller Testfahrten in der Aschaffener Kreuzung bei geringer Geschwindigkeit.

Die Wiederholung der Ergebnisse im Berufsverkehr führt auf Grund der höheren Geschwindigkeit und der fortwährend auftretenden dynamischen Verdeckungen zu einer höheren Streuung der Positionsdaten. Auch hier zeigt sich der Filter robust bezüglich des longitudinalen Fehlers, reagiert aber stärker bei den Fehlern der lateralen Position und des *Heading*-Winkels. Eine Aussage über den Fahrstreifen kann nur mit einer vom Abstand zur Kreuzung abhängigen Wahrscheinlichkeit getroffen werden, beispielsweise mit ca. 90% Wahrscheinlichkeit innerhalb des Abstandsintervalls [20m, 40m].

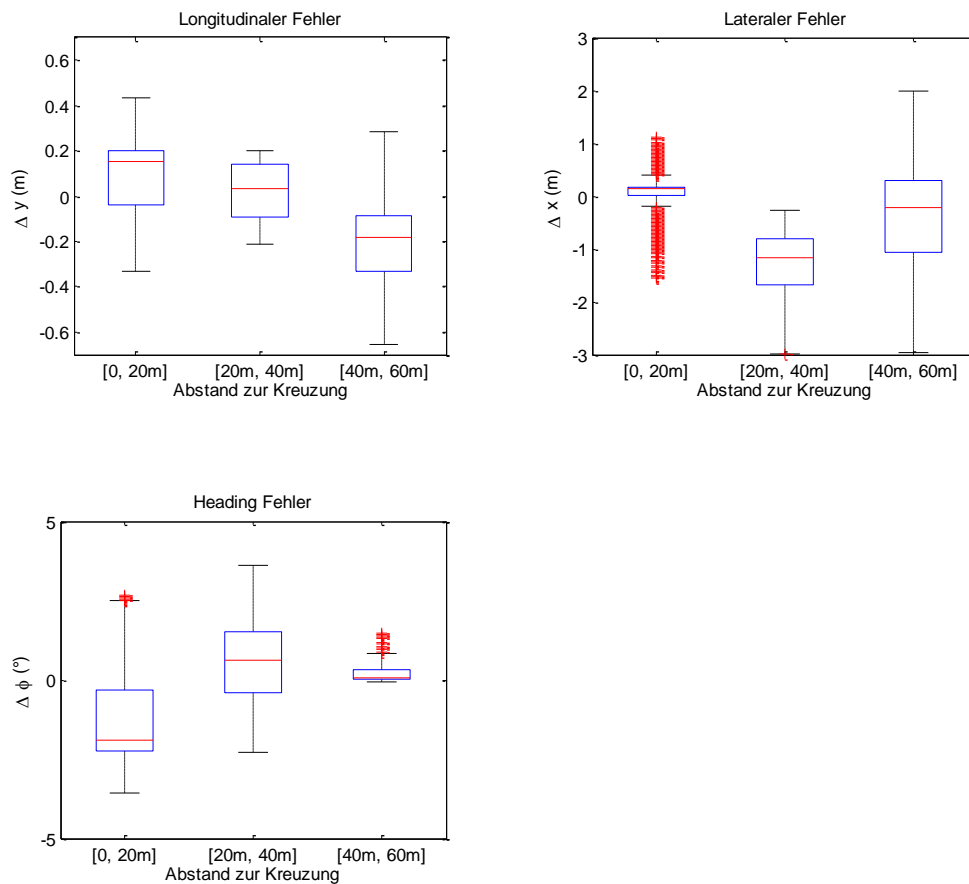


Abbildung 56: Longitudinale und laterale Fehler sowie Fehler im *Heading*-Winkel aller Testfahrten in der Aschaffenburger Kreuzung bei Geschwindigkeit von ca. 50 km/h im Verkehrsfluss des Berufsverkehrs.

3.2.8 Informationsfusion verschiedener Lokalisierungsergebnisse (TAP 2.680)

3.2.8.1 Untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

In Abstimmung zwischen BMW und FORWISS wurde der im Folgenden beschriebene Ansatz zur Fusion von Lokalisierungsergebnissen im BMW-Versuchsträger umgesetzt. Bei der abschließenden Auswertung der Fusion mit Messdaten der Aschaffenburger Kreuzung werden exemplarisch folgende Lokalisierungsansätze berücksichtigt:

- Eigenlokalisierung mittels *Loosely Coupled GPS/INS* (LCS, nicht Teil der Entwicklungen in Ko-PER)
- Eigenlokalisierung mittels *Tightly Coupled GPS/INS* (TCS)
- Eigenlokalisierung mittels kooperativer Transponder (Ko-TAG)

Da die oben genannten Lokalisierungsansätze unterschiedliche Teilmengen der den Fahrzeugzustand beschreibenden Größen schätzen, gilt es, durch eine Fusion der Einzelansätze eine möglichst umfangreiche, genaue und konsistente Schätzung der tatsächlichen Fahrzeugparameter zu erhalten. Die minimal zu befüllende Teilmenge besteht aus folgenden Größen sowie deren Unsicherheiten:

- Breitengrad (WGS84 Latitude)
- Längengrad (WGS84 Longitude)

- Orientierung der Fahrzeuglängsachse gegenüber Ost (positiv, also gegen den Uhrzeigersinn, angetragen)

Die Lokalisierungsmodule übertragen die geschätzten Eigenlokalisierungslösungen EL_i in Form des Fahrzeugzustandes x_i und der zugeordneten Kovarianzmatrizen P_i zyklisch an die Fusionseinheit. In der Fusionseinheit findet, wie in Abbildung 57 dargestellt, zuerst eine Vorverarbeitung der Eigenlokalisierungslösungen statt. In diesem Vorverarbeitungsschritt werden die Eigenlokalisierungslösungen falls nötig zuerst auf den Ko-PER Bezugspunkt transformiert und anschließend auf den Beginn des aktuellen Fusionszyklus (*Start of Cycle – SoC*) prädiziert. Bei dieser Prädiktion kommt ein erweiterter Kalman Filter in Verbindung mit einem Bewegungsmodell für konstante Beschleunigung und Gierrate zum Einsatz.

Im Anschluss werden die von mehreren Eigenlokalisierungsansätzen gleichzeitig zur Verfügung gestellten Größen miteinander fusioniert. Größen, die nur von einem einzigen Lokalisierungsansatz bereitgestellt werden, werden zusammen mit der angegebenen Unsicherheit in den globalen Zustand übernommen. Das gesamthafte Fusionsergebnis EL_{FUS} wird am Ausgang des Fusionsmodul zur Verfügung gestellt.

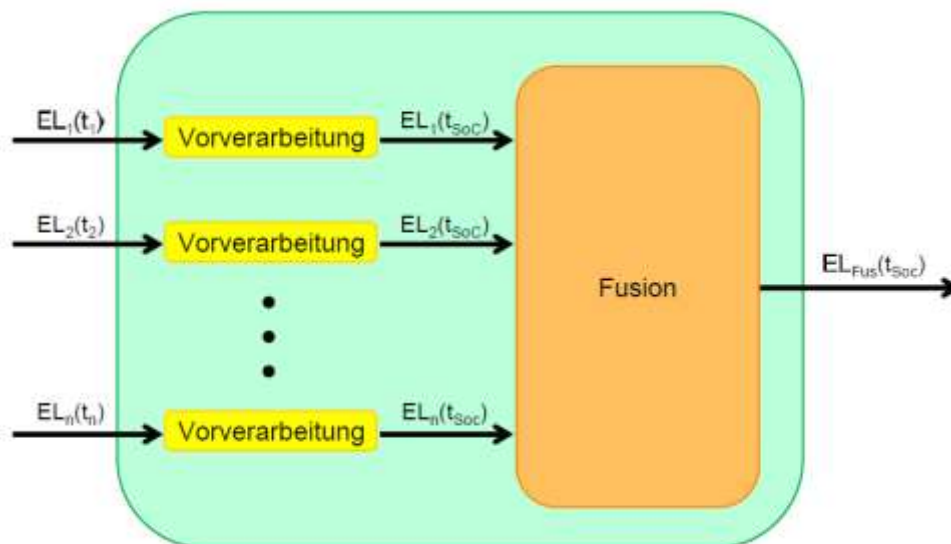


Abbildung 57: Konzept der Eigenlokalisierungsfusion

Da die oben genannten Eigenlokalisierungsansätze bereits zeitliche gefilterte Schätzwerte des Fahrzeugeigenzustandes liefern, können diese Ergebnisse mittels der Algorithmen der sog. Track-to-Track Fusion miteinander fusioniert werden. Dabei sind insbesondere die zeitliche Korrelation aufeinanderfolgender Lokalisierungsergebnisse der Einzelansätze sowie die Korrelation zwischen den verschiedenen Ansätzen aufgrund des gemeinsamen Prozessrauschens zu beachten. Ein weit verbreiteter Ansatz ist die Fusion mit Hilfe des sog. *Covariance Intersection (CI)* Algorithmus, da hier keine explizite Kenntnis über die Korrelationen der zu fusionierenden Tracks nötig ist, sondern diese implizit durch die konservative Natur des Fusionsalgorithmus berücksichtigt werden. Da das für den CI Algorithmus zu lösende Optimierungsproblem nicht analytisch lösbar ist, werden in der Literatur analytische Näherungsverfahren vorgeschlagen, zu denen u.a. der *Improved Fast CI (IFCI)* Algorithmus zählt, der in der hier beschriebenen Eigenlokalisierungsfusion seine Anwendung findet.

3.2.8.2 Erzielte Ergebnisse

Für die experimentelle Evaluierung der Algorithmen werden Messdaten von realen Fahrten aufgenommen. Im Rahmen der Forschungsinitiative Ko-FAS steht in Aschaffenburg eine mit Transpondern ausgestattete Kreuzung zur Verfügung (Abbildung 58). Somit sind an der Versuchskreuzung in Aschaffenburg mit dem LCS, TCS und Ko-TAG (s. μ MS-2.670-4) drei Eigenlokalisierungssysteme funktionsfähig.



Abbildung 58: Versuchskreuzung in Aschaffenburg

Untersucht werden unter anderem der Einfluss der Fusionsreihenfolge sowie der Fusionsstrategie auf das Fusionsergebnis. Die Ergebnisse der gewählten Fusionsreihenfolge für die beiden Fusionsstrategien Sensor-to-Sensor und Sensor-to-Global sind in Abbildung 59 und Abbildung 60 für ein exemplarisches Szenario angegeben. Hinsichtlich ihrer Genauigkeit weisen beide Fusionsstrategien im vorliegenden Fall nur geringfügige Unterschiede auf.

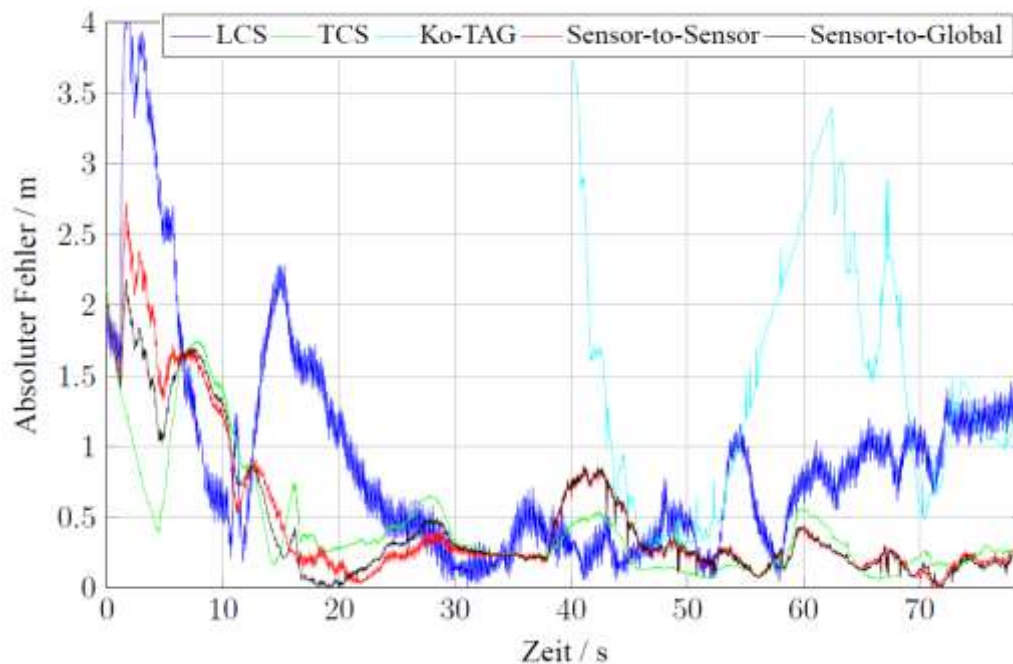


Abbildung 59: Absoluter Positionsfehler der beiden Fusionsstrategien

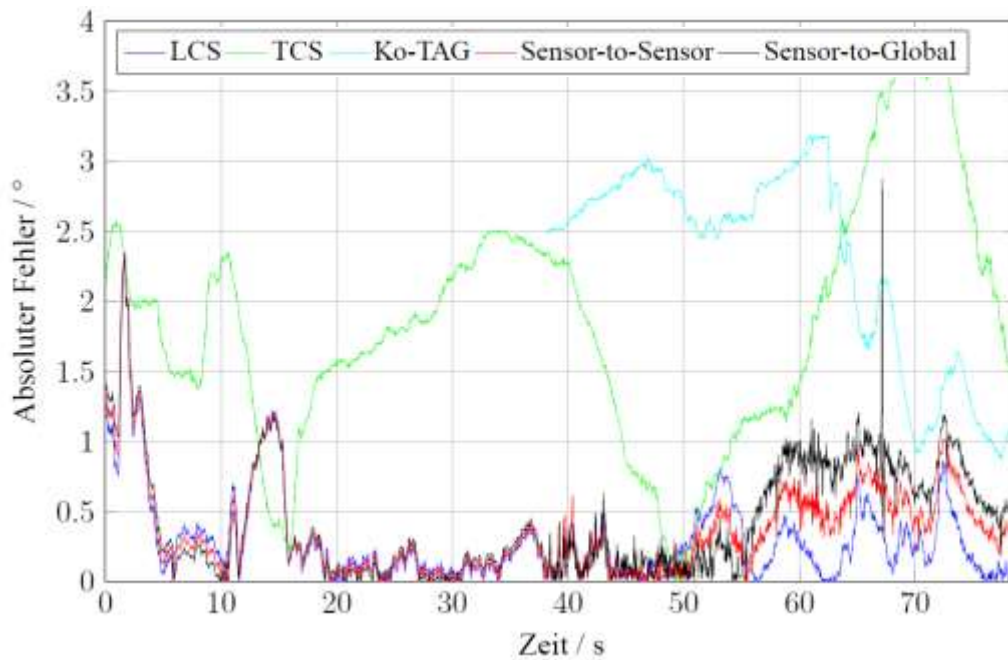


Abbildung 60: Absoluter Ausrichtungsfehler der beiden Fusionsstrategien

Bei alleiniger Betrachtung dieses Ergebnisses ist der zusätzliche Aufwand durch die Propagation und Fusion des globalen Track bei der Sensor-to-Global Fusionsstrategie nicht gerechtfertigt. Dennoch sollte beachtet werden, dass die Propagation des globalen Tracks einen entscheidenden Vorteil bringt. Falls alle verfügbaren Eigenlokalisierungssysteme kurzzeitig ausfallen, wird durch die Propagation des globalen Tracks eine lückenlose Lokalisierung zu Beginn jedes Zyklus gewährleistet. Des Weiteren können die Daten des prädizierten globalen Tracks für die Prädiktion von Eigenlokalisierungslösungen verwendet werden, die selbst keine Dynamikinformationen (beispielsweise die Geschwindigkeit) liefern. Aus diesem Grund wird für die weiteren Betrachtungen die Sensor-to-Global Strategie verwendet. Die mittleren absoluten Fehler für die Sensor-to-Global Fusionsstrategie im betrachteten Szenario sind noch einmal in Tabelle 13 zusammengestellt.

System	Mittlere absoluter Fehler	
	Position	Ausrichtung
LCS	0.91 m	0.3°
TCS	0.43 m	1.8°
Ko-TAG	1.67 m	2.3°
Fusion	0.46 m	0.4°

Tabelle 13: Mittlerer absoluter Fehler für ein exemplarisches Szenario (Sensor-to-Global)

Eine weitere Anforderung an die zu fusionierenden Eigenlokalisierungsergebnisse ist ihre Konsistenz. Sind sie inkonsistent, ergibt sich ein ebenso inkonsistentes Fusionsergebnis. Ein überoptimistisches System würde eine große Gewichtung erhalten und das Fusionsergebnis unter Umständen verschlechtern. Ein überpessimistisches System hingegen würde eine zu schwache Gewichtung bekommen und somit einen vernachlässigbaren Beitrag zur Fusion leisten. Aus diesem Grund müssen Lokalisierungssysteme auf ihre Konsistenz geprüft wer-

den. Mithilfe eines Referenzsystems kann der NEES-Wert (*Normalized Estimation Error Squared*) der einzelnen Lokalisierungssysteme ermittelt und eine Konsistenzprüfung vorgenommen werden. Damit ein System als konsistent eingestuft werden kann, muss sich der NEES der Lokalisierungsgrößen innerhalb eines vorgegebenen Konfidenzintervalls befinden. In dieser Arbeit wurde dazu ein 95%-Konfidenzintervall gewählt. Die zu fusionierenden Eigenlokalisierungsansätze sind im vorliegenden Szenario unter dieser Annahme allesamt konsistent.

Der NEES des fusionierten Zustands ist in Abbildung 61 dargestellt. Wie sich zeigt, bewegt sich auch der NEES des Fusionsergebnisses im gesamten Zeitraum innerhalb der Schranken des Konfidenzintervalls. Das Ergebnis ist damit ebenfalls konsistent.

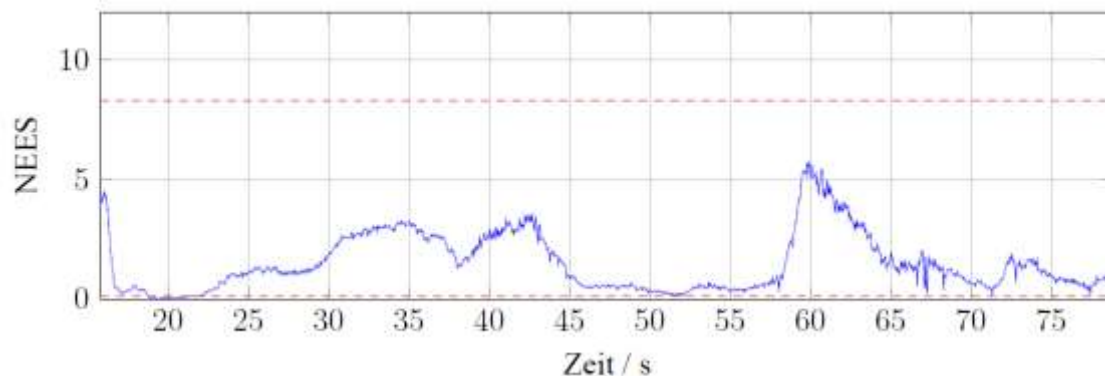


Abbildung 61: NEES der Fusion

3.2.9 Abschließende Bewertung der verschiedenen Lokalisierungsansätze

Den verschiedenen in Ko-PER untersuchten Lokalisierungsansätzen ist zunächst ein stark unterschiedlicher Reifegrad zu bescheinigen. Zwei der untersuchten Methoden, nämlich die kooperative Lokalisierung und die Lokalisierung mit Ko-TAG Transpondern kamen über eine reine Implementierung und einen prinzipiellen Funktionsnachweis nicht wesentlich hinaus.

Die mit Ko-TAG 1.0 erzielten, *off-line* ausgewerteten Lokalisierungsergebnisse, die allein auf der Auswertung der ToF Abstandmessungen beruhen, ohne die mit diesem System ebenfalls verfügbare Orientierungsinformation zu nutzen, zeigten zwar Positionsgenauigkeiten im Rahmen der für Ko-PER formulierten Anforderungen, allerdings wurden die vorgegebenen Orientierungsgenauigkeiten nicht erreicht. Hinzu kommt, dass die erzielten Ergebnisse in einem höchst artifiziellen Umfeld mittels einer Matrix von acht Transpondern erzielt wurden, bei denen Mehrwegeausbreitungen so gut wie ausgeschlossen werden können – vgl. Abbildung 45 auf Seite 61¹². Das gewählte Umfeld entspricht in keiner Weise dem Anwendungsfall der lokalen Unterstützung im Umfeld einer Infrastruktureinrichtung.

Demgegenüber wurden die Untersuchungen mit Transpondern der Generation Ko-TAG 2.0 unter wesentlich realistischeren Bedingungen (im Nacht- und Berufsverkehr) an der Aschafenerburger Testkreuzung durchgeführt. Hierbei kam lediglich ein Transponder-Paar zum Einsatz, wobei nicht nur Abstands- sondern auch Winkelmessungen zugrunde gelegt wurden. Die damit erzielten Genauigkeiten lagen im Bereich der Ko-PER Anforderungen, allerdings machten sich im Berufsverkehr bedingt durch Signalreflexionen größere Abweichungen der lateralen Position und der Orientierungsbestimmung des Fahrzeugs bemerkbar. Die Auswertung der mit Ko-TAG 2.0 eingefahrenen Daten erfolgte *off-line*. – Aufgrund der späten Verfügbarkeit der Ko-TAG 2.0 Systeme konnten Verfahrensverbesserungen bei der Datenauswertung und systematischere Untersuchungen im Online-Betrieb nicht durchgeführt werden.

¹² Tatsächlich verfolgten die durchgeführten Arbeiten in erster Linie das Ziel, im Rahmen des Ko-TAG Projekts eine kostengünstige Alternative zu den teuren GNSS/INS Referenzsystemen zu entwickeln, die üblicherweise zur Absicherung von Funktionen der Fahrerassistenz verwendet werden, und weniger dem Zweck, für Ko-PER eine funktionstüchtige Lokalisierungslösung an Kreuzungen darzustellen.

Die georeferenzierte Positionierung mittels kooperativer Lokalisierung bedient sich ebenfalls eines stationär verbauten Geräts, in diesem Falle einer Drahtlos-Kommunikationseinheit. Auch bei diesem Ansatz kam es nur zu wenigen prototypischen Messfahrten. Die erforderlichen Genauigkeiten wurden lediglich in unmittelbarer Kreuzungsnähe erreicht. Algorithmische Verfahrensverbesserungen und eine systematischere Untersuchung des Ansatzes sind denkbar, konnten aber im Projektverlauf nicht mehr geleistet werden.

Im Vergleich zu den in diesem Abschnitt bereits skizzierten Methoden zur Fahrzeug-Eigenlokalisierung kommt der Kombination aus *Tightly Coupled* GNSS/INS, hochgenauen digitalen Karten und der sensorischen Erfassung der darin verzeichneten straßenbegleitenden Landmarken ein entscheidend höherer Reifegrad zu. Das Verfahren beruht auf der Idee, mittels GNSS Positionierung eine grobe georeferenzierte Position zu bestimmen, die es mittels Map-Matching gestattet, die Position und Orientierung des Fahrzeugs mit der erforderlichen Genauigkeit schritthaltend zu bestimmen. Den genannten Modulen kommt dabei jeweils folgender Stellenwert zu:

1. Das TCS verfügt gegenüber einem handelsüblichen GNSS zwar über keine grundlegend bessere Genauigkeit, zeichnet sich aber bei geringer Anzahl sichtbarer Satelliten durch deutlich bessere Verfügbarkeit der Lokalisierungslösung aus.
2. Die in Ko-PER entwickelte, auf Kreisbogensplines basierte Repräsentation des Fahrbahn- und Fahrstreifenverlaufs (inkl. Höhenprofil, Fahrstreifen, Leitpfosten und anderen straßenbegleitenden Objekten) bietet gegenüber bisherigen Darstellungen eine Fülle von Vorteilen in punkto geometrischer Auswertung, schritthaltender Nutzung, geringem Speicherbedarf und hierarchischer Zugriffsmöglichkeit.
3. In der unter Punkt 2. charakterisierten hochgenauen Karte finden sich unter anderem Einträge diverser charakteristischer Objekte vergleichsweise geringer Vorkommensdichte. Deren Detektion mittels fahrzeuglokaler, lateral hochauflösender Sensoren (Laserscanner, Videokamera) gestattet es per *High Precision Map-Matching* Positionierungsgenauigkeiten im Bereich von einem bis weniger Dezimeter und unter 1° zu erzielen.

Dies wurde nicht nur bei Überlandfahrten im Online-Versuch wiederholt bestätigt, sondern konnte auch an der Versuchskreuzung Aschaffenburg gezeigt werden.

Die etwas pauschale Aussage des letzten Satzes bedarf allerdings folgender Erläuterung: Während bei den Überlandfahrten eine Kombination aus Laserscanner (LS) und Bildfolgenauswertung zum Einsatz kam (wobei der abstandgebende LS vorwiegend der longitudinalen, die Videokamera der lateralen sowie der Orientierungsgenauigkeit zugute kam), basierte die im Projekt realisierte Eigenpositionierung an der Versuchskreuzung Aschaffenburg ausschließlich auf Laserscanner-Daten. Dies hat keine Ursachen grundsätzlicher Natur, sondern ist allein den im Projekt verfügbaren Ressourcen geschuldet.

Schließlich wurde der Eigenlokalisierungsansatz mit Landmarken rein videobasiert ohne Verwendung der Punktlandmarken eines Laserscanners evaluiert. Die Qualität des Lokalisierungsergebnisses hing stark von der Genauigkeit der initial verwendeten GNSS Position ab. Der laterale Fehler verbesserte sich aber nach ca. 60 *Frames* auf die übliche Genauigkeit. Hingegen blieb der longitudinale Positionsfehler bei schlechtem initialen GNSS-Empfang auch nach längerer Zeit noch groß. Punktlandmarken sind mithin für eine gute Lokalisierung in Fahrtrichtung wichtig. Der Grund hierfür liegt in der fehlenden Möglichkeit, einzelne Abschnitte einer unterbrochenen Fahrstreifenbegrenzung voneinander zu unterscheiden. Hat man eine initial korrekte Zuordnung zu den unterbrochenen Markierungen, so ist eine Eigenlokalisierung mit einer einzelnen Kamera unter Verwendung auf Punktlandmarken möglich. Zur Berücksichtigung der Punktlandmarken könnte aber alternativ zum Laserscanner auch ein Stereokamerapaar eingesetzt werden.

Hingegen zeigte die alleinige Verwendung von Laserscannern zur Landmarkenauffindung an Kreuzungen bei hohem Verkehrsaufkommen (bzw. beim Vorhandensein ausge-

dehnter fahrbahnparalleler Absperrungen¹³) infolge des Einbauorts und der geringen vertikalen Apertur handelsüblicher Laserscanner deutliche Nachteile: Die Landmarken sind in solchen Szenarien überwiegend verdeckt und damit nicht mehr detektierbar. Der Einsatz von Kameras mit ihren im Fahrzeug höher gelegenen Einbauorten und großen vertikalen Öffnungswinkeln ist hier von Vorteil¹⁴. Die Bearbeitung einer entsprechenden Erweiterung des Lokalisierungsansatzes war wegen fehlender Ressourcen nicht mehr möglich.

Ein anderes im urbanen Verkehr regelmäßig auftretendes Problem ist die Verdeckung von Satelliten durch die Randbebauung. Hierzu wurde der Vorschlag unterbreitet, die Verfügbarkeit der TCS Navigationslösung durch Fusion mit Fahrzeug-Odometrie-Information zu stützen, was aber aufgrund beschränkter Ressourcen im Rahmen von Ko-PER nicht mehr umgesetzt werden konnte. Aus diesem Grund mussten für die bei der Ko-FAS Abschlusspräsentation an der Aschaffener Versuchskreuzung gezeigten Fahrzeugfunktionen sämtlich auf Lokalisierungslösungen von High-End Referenzsystem zurückgegriffen werden.

Trotz der in Ko-PER mit den oben beschriebenen Verfahren erzielten Fortschritte ist die Fahrzeug-Eigenlokalisierung hinreichender Genauigkeit mit Geräten im Niedrigpreissektor ein nach wie vor offenes Problem. Die erarbeiteten Ergebnisse weisen jedoch in die Richtung künftiger Lösungsmöglichkeiten.

3.3 Kreuzungsperzeption (AP 2.200 und 2.300)

In diesem Abschnitt werden Aufbau und Betrieb der Musterkreuzungen (AP 2.200) und die Arbeiten zur Kreuzungsperzeption (AP 2.300) beschrieben.

3.3.1 Aufgabenstellung und Zielsetzungen

Die im AP 2.200 definierten Aufgaben beinhalten die Erarbeitung der Anforderungen an und die Spezifikationen für die Ko-PER Versuchskreuzungen (TAP 2.210), deren Hardwareausstattung (TAP 2.220), ihre datentechnische Repräsentation (TAP 2.230), den Aufbau, Betrieb und die Instandhaltung der öffentlichen Versuchskreuzung in Aschaffenburg (TAP 2.240) sowie den Aufbau und den Betrieb zweier zu Entwicklungszwecken installierter Testkreuzungen (TAP 2.250).

Die im AP 2.300 definierten Aufgaben umfassen die Algorithmen-Entwicklung zur Kreuzungsperzeption (AP 2.310), die Perzeptionstests (AP 2.320) sowie Messkampagnen und die Lieferung von Datensätzen (AP 2.330).

3.3.1.1 Aufbau, Betrieb und Instandhaltung der Kreuzungen

Ziel dieser Arbeitspakete ist es, zwei Musterkreuzungen zu Entwicklungszwecken auf geschlossenen Firmengeländen und eine öffentliche Versuchskreuzung zur Erfassung der Verkehrsteilnehmer im Umfeld der Kreuzung aufzubauen und in Echtzeit zu betreiben. Wahrnehmungslücken eines Fahrzeugs im Kreuzungsbereich, die sich beispielsweise durch den fließenden Verkehr und die Kreuzungsrandbebauung zwangsläufig ergeben, sollten damit insbesondere an der öffentlichen Kreuzung vollständig geschlossen werden. Die beiden nicht öffentlichen Testkreuzungen dienen zur Vorentwicklung der mit Sensorik und Algorithmik aufwändiger ausgestatteten öffentlichen Musterkreuzung sowie zur Evaluierung von Perzeptionsalgorithmen. Sie sollen von Projektbeginn an die Erprobung sicherheitskritischer Szenarien gestatten, unbeschränkt durch die Forderung der Anonymisierung der Verkehrsteilnehmer an öffentlichen Verkehrsinfrastrukturen. Die öffentliche Versuchskreuzung diene als

¹³ Dies war beispielsweise bei der Ko-FAS Schlusspräsentation gegeben.

¹⁴ Laternenpfähle, Gebäudekanten, Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen, Fensterausschnitte und andere Strukturen oberer Gebäude-Stockwerke, um nur einige Beispiele zu nennen, entziehen sich in vielen Fällen dem Verdeckt Werden durch andere Fahrzeuge.

zentrales Testfeld der entwickelten Ko-PER Funktionen im fließenden Verkehr unter realen Umfeld-Bedingungen.

3.3.1.2 Anforderungen an die öffentliche Musterkreuzung, Spezifikationen, Hardwareausstattung und datentechnische Repräsentation

In diesen Arbeitspaketen wurden, die szenariospezifischen Aspekte ausgewählter Beispielapplikationen, die Ableitung der Anforderungen an die geometrischen und verkehrstechnischen Gegebenheiten sowie an die einzusetzenden Sensoren, die Festlegung der Kreuzungselektrik und –elektronik zur Perzeption und die Spezifikation der kreuzungsspezifischen Kommunikationsinhalte erarbeitet. Auf dieser Basis war der Entwurf des Kreuzungsperzeptionssystems zu erstellen, der das Sensorsystem, das Datenerfassungssystem und die Integration der Ko-TAG Transponder und Kommunikationseinheiten sowie die der Lichtsignalanlage umfasst.

3.3.1.3 Algorithmenentwicklung zur Kreuzungsperzeption

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung neuartiger Algorithmen zur Kreuzungsperzeption und zur Fußgängerintentionserkennung. Dies umfasst die Simulation und Planung der Kreuzungssensorik, die Implementierung der Kalibriersoftware für die eingesetzten Sensoren und hardwarebeschleunigte Echtzeitbildverarbeitung unter Einsatz von GPUs (*Graphics Processing Units*) und FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*).

Basierend auf den Daten der kalibrierten Sensoren wurden Algorithmen zur Detektion und Verfolgung aller Verkehrsteilnehmer implementiert. Die Daten der unterschiedlichen Sensorsysteme wurden anschließend fusioniert und mit Hilfe geeigneter Nachrichtenformate an Fahrzeuge im Kreuzungsbereich übermittelt.

3.3.1.4 Perzeptionstest Kreuzung, Kreuzungs-Messkampagnen und Lieferung von Datensätzen

Diese Arbeitspakete hatten zum Ziel, die neu entwickelten Algorithmen des Kreuzungsperzeptionssystems systematisch zu testen. Als Testbasis dienten Szenarien, die häufig zu Kreuzungsunfällen beitragen. Es wurden sowohl die Einzelkomponenten, als auch das Fusionssystem bewertet. Hierzu wurde ein Testplan erarbeitet, Messdaten für alle relevanten Szenarien gesammelt und den Verbundpartnern zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse wurden in einem Evaluierungsbericht zusammengefasst und diskutiert.

3.3.2 Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Methodik und die durchgeführten Arbeiten zum Aufbau der Musterkreuzungen und zur Entwicklung der Kreuzungsperzeption.

3.3.2.1 Aufbau und Betrieb der Musterkreuzungen

Zur Konzepterstellung für die nicht öffentlichen Testkreuzungen und die öffentliche Musterkreuzung wurden zunächst die Anforderungen an die Kreuzungseigenschaften erarbeitet. Dem Anforderungskatalog an die Kreuzungseigenschaften liegt eine Zusammenstellung von Musterszenarien nach GIDAS, die sich an einer öffentlichen Kreuzung abbilden lassen, zugrunde. Als Kreuzungsstandorte wurden ein Firmengelände der Daimler AG in Ulm, der vom Unternehmen Continental Safety Engineering International betriebene Verkehrssicherheitspark in Alzenau (für die nicht öffentlichen Testkreuzungen) sowie eine unmittelbar an die Hochschule Aschaffenburg angrenzende Kreuzung (als öffentliche Musterkreuzung) festgelegt.

Abbildung 62 zeigt die Testkreuzung in Ulm mit der an zwei Lichtmasten verbauten Sensorik.



Abbildung 62: Aufbau der Testkreuzung in Ulm

Abbildung 63 zeigt die Versuchskreuzung in Alzenau. Das Bild ist aus mehreren Einzelaufnahmen zusammengesetzt, die von einer Hebebühne aus gemacht wurden. Rechts hinten im Bild ist die mobile Zentraleinheit zur Datenerfassung zu sehen.



Abbildung 63: Aufbau der Versuchskreuzung Alzenau

Abbildung 64 und Abbildung 65 illustrieren den Aufbau der öffentlichen Kreuzung in Aschaffenburg. Das animierte linke Bild in Abbildung 64 gibt einen Überblick. Von links oben nach rechts unten verläuft die Würzburger Straße, von rechts oben mündet die Flachstraße ein, von rechts unten die Spessartstraße. Im Markierungskreis des rechten Bildes sichtbar ist ein Schaltschrank, welcher die RCCU und eine der Ko-TAG-2.0-Einheiten enthält: Die beiden RCCU-Antennen sind ebenfalls im Kreis zu erkennen. Der Kabelstrang führt in den Ko-PER-Kontrollraum in der Hochschule Aschaffenburg (Fenster im Souterrain).



Abbildung 64: Aufbau der öffentlichen Musterkreuzung in Aschaffenburg

Abbildung 65 zeigt Sensormontagebeispiele.



Abbildung 65: Sensormontagebeispiele an der öffentlichen Versuchskreuzung in Aschaffenburg

Mit der Festlegung der Standorte der Musterkreuzungen konnten das Aufbaukonzept und der Plan der Sensoranordnung erarbeitet und die Komponenten der Kreuzungselektronik (Sensoren, Datenerfassungssystem, Rechner, Datenspeicherung und Netzwerk, Zeitsynchronisation, Kommunikation) beschafft, installiert und in Betrieb genommen werden. Die Installation des Sensornetzwerks an der öffentlichen Kreuzung beinhaltet unterirdische und oberirdische Verkabelung unter Nutzung sowohl vorhandener als auch zusätzlich aufzubauender Infrastruktur einschließlich erforderlicher Erdarbeiten.

Der Festlegung der Kreuzungs-Videosensorik gingen eine Recherche und die Erprobung einer Vorauswahl geeigneter Objektive und normal- sowie hochauflösender Kameras mit monochrom-CCD- oder HDR- (High Dynamic Range-) CMOS-Sensor sowie erste Testaufnahmen an der öffentlichen Kreuzung und der Versuchskreuzung Alzenau voraus. Die Tests wurden unter realen Bedingungen bei verschiedenen Beleuchtungssituationen (Tag, Dämmerung, Nacht) durchgeführt. Zur Auswahl des hochauflösenden Video-Subsystems standen die Fußgänger- und Bewegungsmustererkennung im Vordergrund. Die Lidarsensorik wurde an der Experimentalkreuzung in Ulm getestet. Unter Berücksichtigung von simulierten Sensorpositionen und -gesichtsfeldern (Abbildung 66, oberste Zeile) wurden die Sensor-Positionen und Ausrichtungen festgelegt sowie Konzepte zur effizienten Kabelführung für die Musterkreuzungen entwickelt. An der öffentlichen Kreuzung waren zusätzlich die Vorgaben der

Stadt Aschaffenburg und die Interessen der Anwohner zu berücksichtigen. Das Installationskonzept wurde mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege abgestimmt.

Zur Datenerfassung an der öffentlichen Kreuzung wurde ein unmittelbar an die Kreuzung angrenzender Raum der Hochschule Aschaffenburg als Kontrollzentrum ausgebaut. Dem Datenerfassungssystem (Datenaufzeichnung, Echtzeitverarbeitung und Datenwiedergabe) liegen eine Abschätzung der zu übertragenden und zu speichernden Datenraten sowie der Aufbau eines Testsystems zu Grunde. Eine besondere Herausforderung bestand in der Erstellung einer Software zur zeitsynchronen, mit GNSS-Zeitstempeln versehenen, unkomprimierten Speicherung der Videodaten mehrerer Kameras und den Untersuchungen zu den real erreichbaren Datenraten und zur Fehlerresistenz des Systems.

Der endgültigen Installation der Ko-PER Kreuzungskommunikationseinheit (RCCU) mit einer Sendeeinheit nach Standard IEEE 802.11p ging zunächst ein Testbetrieb an der öffentlichen Kreuzung voraus. Darin wurde die Feldverteilung des Senders in der Kreuzung und den vier Kreuzungsarmen bis zu einem Radius von 100 m vermessen und kartiert. Die Ergebnisse führten zur endgültigen Positionierung der RCC-Einheiten. Ferner wurden an der öffentlichen Kreuzung ein DGPS und zwei Ko-TAG-Module 2.0 sowie ein neues Steuergerät für die Lichtsignalanlage installiert und in Betrieb genommen. Der Echtzeit-Status der Lichtsignalanlage kann von diesem Steuergerät abgegriffen, vom Kreuzungssystem aufbereitet und als *Signal Phase and Timing* (SPaT)-Nachricht versandt werden.

Die Installation der Sensorik unter Einbezug des Datenabgriffs an der Lichtsignalanlage an der öffentlichen Kreuzung wurde von den Projektpartnern zusammen mit dem Unterauftragnehmer SWARCO und der Stadt Aschaffenburg realisiert, die nicht öffentlichen Testkreuzungen wurden von den Projektpartnern vollständig in Eigenregie aufgebaut.

3.3.2.2 Arbeiten zur Kreuzungsperzeption

Zur Realisierung der Anforderungen an die Kreuzungsperzeption wurde die in Abbildung 66 gezeigte Struktur entworfen. Hierbei übernehmen die Standardkameras die Aufgabe der Detektion und Klassifikation von Fahrzeugen in den Kreuzungszufahrten. Die große Reichweite des optischen Systems bis weit in die Kreuzungsarme hinein ermöglicht somit eine frühe Detektion aller auf die Kreuzung zufahrenden Fahrzeuge. Durch ein Netzwerk von Laserscannern werden im Ko-PER Perzeptionssystem Fahrzeuge, Zweiräder sowie Fußgänger im Zentralbereich der Kreuzung und auf den Zufahrten erfasst und klassifiziert. Der besonders neuralgische Bereich der Versuchskreuzung, an der Ecke Würzburger Straße/Spessartstraße wird zusätzlich von einem zeitlich und räumlich hochauflösenden Kamerasubsystem erfasst. Es besteht aus zwei senkrecht zueinander orientierten HD-Kameras, die eine Weitwinkel-Stereokonfiguration bilden.

Auf Basis der hochauflösenden Kameradaten werden Fußgängerbewegungen erkannt und daraus die Intention der Fußgänger abgeleitet. Zuletzt laufen die Ergebnisparameter aller erkannten Verkehrsteilnehmer im Fusions- und Kommunikationsmodul zusammen, in dem ein konsistente Umfeldrepräsentation der Kreuzung erzeugt und mittels unterschiedlicher Nachrichtenformate (iCPM, PED, SPaT, MAP, CLM) an die Ko-PER Fahrzeuge übermittelt wird.

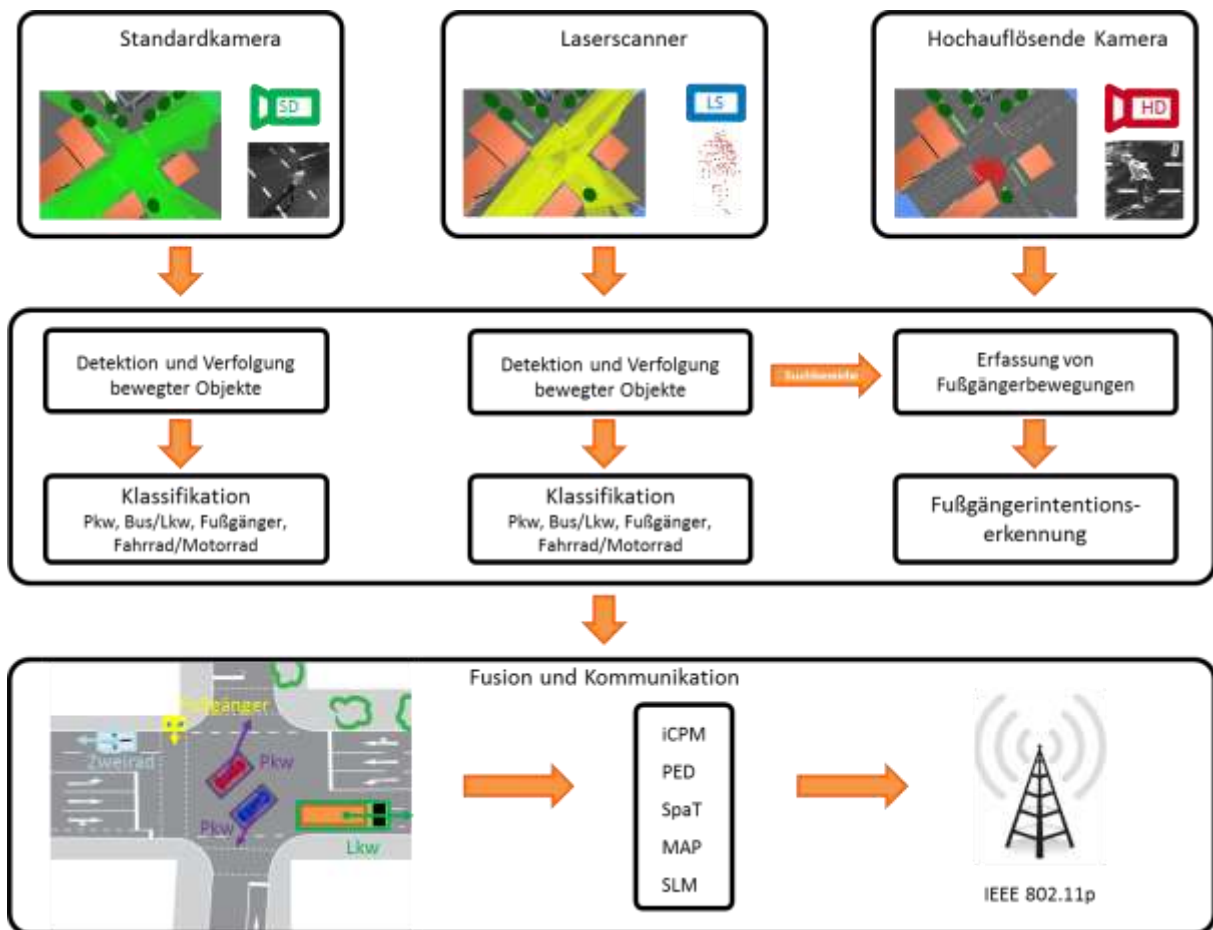


Abbildung 66: Überblick über das Ko-PER Kreuzungsperzeptionssystem

3.3.2.3 Kalibrierung der Sensoren

Die räumliche Kalibrierung des Sensornetzwerkes ist notwendig, um die Information der räumlich verteilten Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien zur hoch genauen Erkennung und Verfolgung von dynamischen Objekten zu nutzen. Hierbei wird die Pose („Pose“ bezeichnet Position und Orientierung) eines jeden Sensors in einem gemeinsamen Koordinatensystem bestimmt. Für die Kamerasysteme, bestehend aus den jeweiligen Bildsensoren und der verwendeten Optik, müssen zusätzlich noch die intrinsischen Parameter bestimmt werden. In Abbildung 67 sind die benötigten Transformationen für das Kamerasystem visualisiert. Zur Bestimmung der intrinsischen Kameraparameter werden Aufnahmen von Schachbrettmustern gemacht, deren Geometrie bekannt ist und die im aufnehmenden Bild präzise detektiert werden können (Abbildung 68). Aus den aufgenommenen Bildern werden die intrinsischen Parameter mittels Maximum-Likelihood Parameterschätzung bestimmt.

Da diese Parameter abhängig von der gewählten Blende und dem eingestellten Fokus sind, wurden die Bilder für die intrinsische Kamerakalibrierung nach der Installation der Kameras aufgezeichnet.

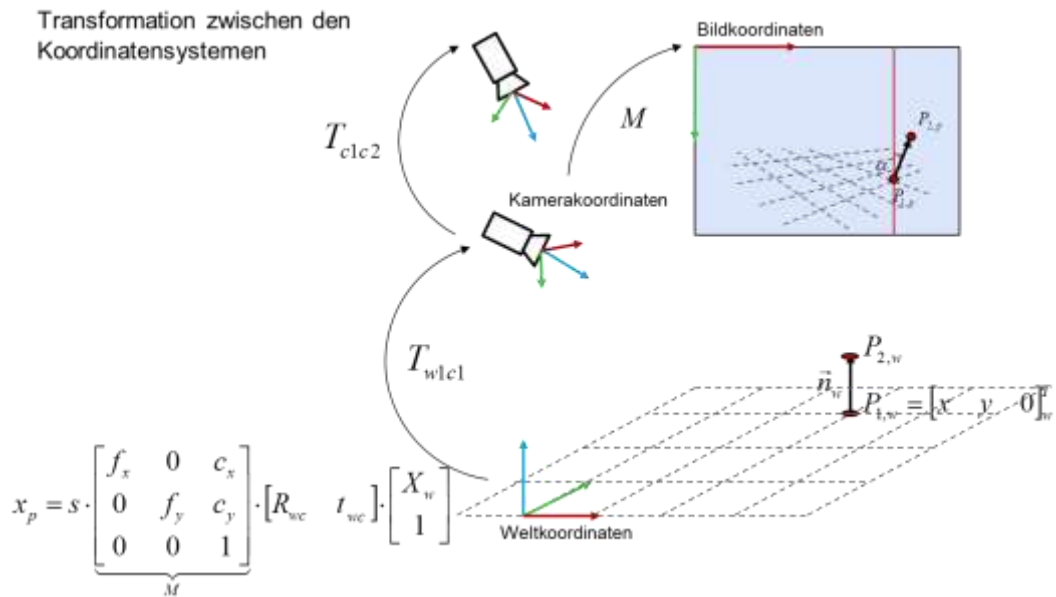


Abbildung 67: Zu bestimmende Transformationen für das Kamerasystem



Abbildung 68: Intrinsische Kalibrierung der Kameras

Zur Berechnung der Pose der Sensoren wurde ein Kalibrierobjekt entwickelt (siehe Abbildung 69), welches sowohl in den Messungen des Kamerasystems, als auch in den Sensordaten des Lasersystems detektiert werden kann. Die besondere Geometrie ermöglicht die Posenbestimmung im Laserscan, die aufgebrachte Schachbretttextur lässt sich dagegen mit dem Kamerasystem detektieren [1], [12].

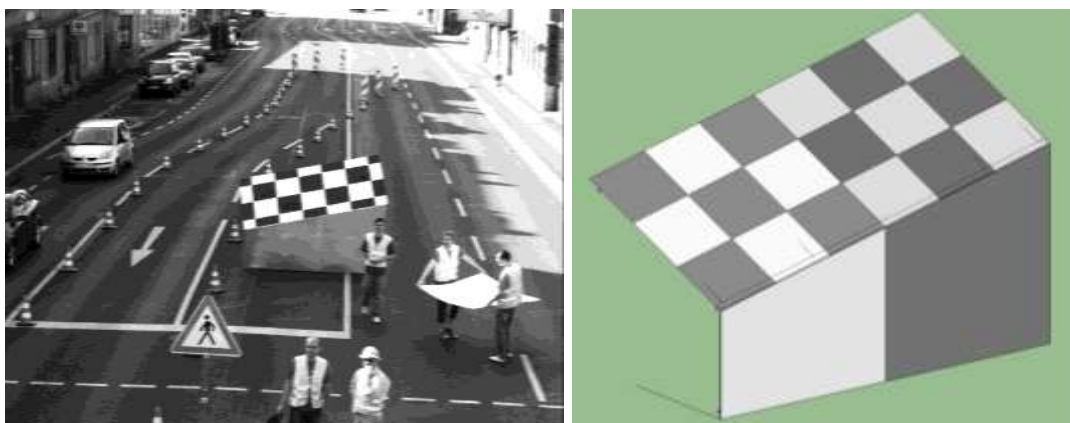


Abbildung 69: Kalibrierobjekt zur simultanen Kalibrierung von Kamerasystem und Laserscanner-Netzwerk

Zusätzlich zu den lokalen Transformationen der Sensoren zum Kreuzungskoordinatensystem ist noch die Transformation in globale Koordinaten notwendig, um die dynamischen Objekte anschließend in globalen Koordinaten an die Ko-PER Fahrzeuge kommunizieren zu können. Hierzu wurde die im Projekt entstandene hochgenaue digitale Karte der Aschaffener Versuchskreuzung verwendet. Analog zur extrinsischen Kalibrierung des Kamerasystems wurden Punkte der digitalen Karte im Bild markiert und anschließend mit einem Optimierungsverfahren die Transformation zwischen dem lokalen und globalen Koordinatensystem berechnet.

3.3.2.4 Objekterkennung

Abbildung 70 gibt einen Überblick zu den Algorithmen des Kreuzungsperzeptionssystems. Die Objektdetektion für beide Sensortypen (Laserscanner und Standardkamera) läuft parallel ab. Im Folgenden werden die einzelnen, in Abbildung 70 visualisierten Verarbeitungsschritte der laserbasierten und anschließend der videobasierten Objektdetektion erläutert. Die von den Sensorsystemen erkannten Objekte werden schließlich fusioniert.

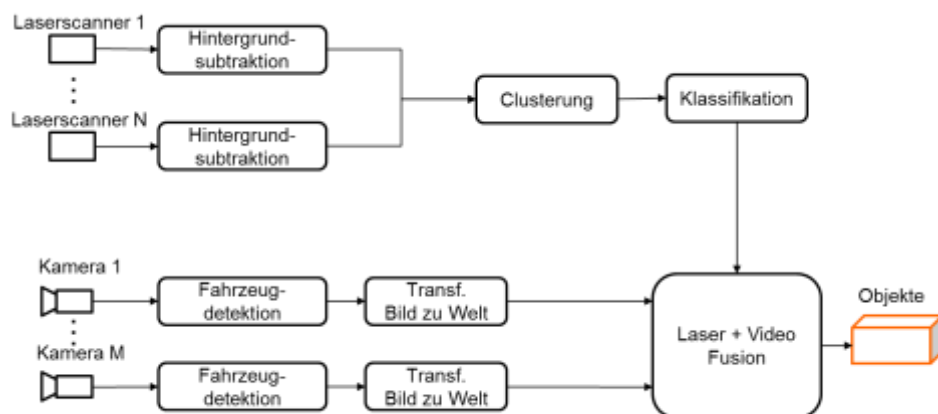


Abbildung 70: Blockschaltbild des Perzeptionssystems

3.3.2.4.1 Laserscanner: Hintergrundsubtraktion

Nachdem die Laserscanner-Messungen mithilfe der mit der Kalibrierung bestimmten Transformationen in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt wurden, können nun Messdaten statischen Objekte (Hintergrund), wie z.B. von Häusern oder der Straßenoberfläche, entfernt werden. Hierzu wurde das aus der Bildverarbeitung bekannte Gauß-Mixturen-Modell (GMM) für Lasermessungen adaptiert. Für jeden Laserstrahl wird ein eigenes GMM gelernt und über die Zeit angepasst. Durch die Verteilung können statische Objekte modelliert und von dynamischen Objekten unterschieden werden. Jede Messung eines Laserstrahls, die innerhalb des Unsicherheitsbereichs einer Gaußverteilung liegt, erhöht die Wahrscheinlichkeit dass diese Verteilung ein statisches Objekt repräsentiert. Daher wird bei jeder Bestätigung das Gewicht der entsprechenden Gaußverteilung erhöht, die Varianz verringert sowie der Mittelwert angepasst. Wird zu einer Messung keine passende Mixturenkomponente gefunden, so wird eine neue Gaußverteilung an der Stelle der Messung aufgesetzt. In dem in Abbildung 71 dargestellten Beispiel werden zur Hintergrundmodellierung für jeden Laserstrahl drei Gaußverteilungen genutzt. Die beiden Gaußverteilungen mit dem höchsten Gewicht modellieren den Hintergrund, während das sich bewegende Fahrzeug durch eine Verteilung mit geringem Gewicht und hoher Varianz repräsentiert wird. Durch diese Modellierung ist es möglich, den Hintergrund vom Vordergrund zu trennen. Weitere Details sind in /15/ gegeben.

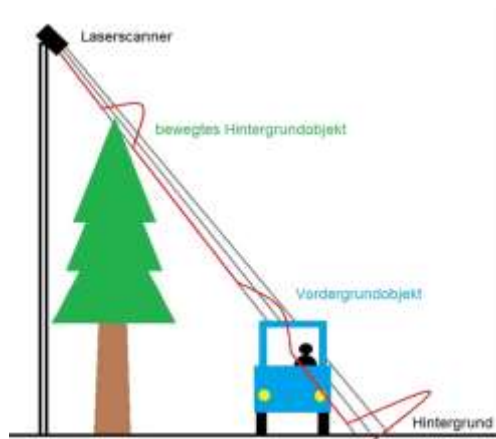


Abbildung 71: Grafische Darstellung des Gauß-Mixturen Model zur Hintergrundsubtraktion bei Laserscannern

3.3.2.4.2 Laserscanner: Clustering

Die vom Hintergrund bereinigten Laserscanner-Messungen werden mit dem *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* (DBSCAN) Verfahren zu Objekten zusammengefasst /15/. Dieses Verfahren benötigt keine Kenntnis über die Anzahl der auftretenden Cluster. Weiterhin kann der Suchbereich, in dem nach Clustermessungen gesucht wird, eine beliebige Form haben und Messausreißer werden zuverlässig erkannt. Um den Rechenaufwand zu minimieren, wurde der DBSCAN Algorithmus erweitert. Hierzu werden die Messungen vor dem Clustern in eine Rasterkarte eingetragen und dort zusammengefasst (*Grid Based DBSCAN*). Zu jedem Cluster wird ein Quader berechnet, welcher die Position, Orientierung und Ausdehnung des Punkteclusters modelliert.

3.3.2.4.3 Laserscanner: Klassifikation

Für die Klassifikation der Lasermessungen wurden umfangreiche Daten markiert und daraus aussagekräftige Merkmale, wie z.B. die Höhe eines Clusters oder die Standardabweichung einer Punktwolke abgeleitet. Mithilfe eines Bayes-Klassifikators kann aus den Verteilungen der verschiedenen Merkmale für die auftretenden Klassen die Klasse des zu klassifizierenden Objektes bestimmt werden. In Abbildung 72 sind beispielhafte Verteilungen dargestellt. In der Abbildung ist zu sehen, dass speziell die z-Komponente der Hauptachse des Punkteclusters und die Standardabweichung der Messpunkte eines Clusters zum Mittelwert charakteristische Merkmale zum Unterscheiden von Fußgängern und PKWs darstellen /13/.

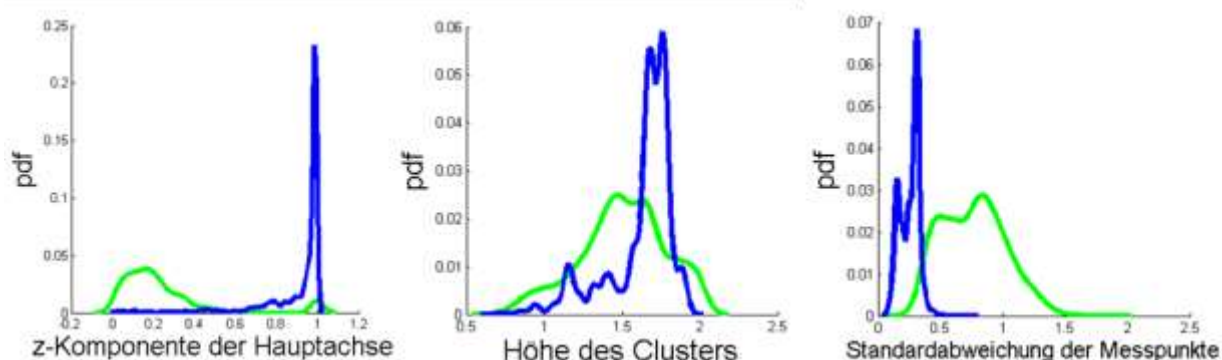


Abbildung 72: Auszug der Merkmale die zur Klassifikation der Lasercluster verwendet wurden. Blau zeigt die Verteilung für Fußgänger und grün für PKWs.

3.3.2.4.4 Video: Fahrzeugdetektion

Zur videobasierten Detektion der Fahrzeuge an der Kreuzung kommt ein Algorithmus basierend auf der Arbeit von Viola und Jones zum Einsatz (siehe Abbildung 73). Durch die Kaskadenstruktur des Klassifikators in Kombination mit den eingesetzten Merkmalen wird eine hohe Detektionsrate bei geringer Rechenzeit erreicht.

Anders als beim Klassifikator von Viola und Jones, kommen bei dem im Projekt Ko-PER eingesetzten Klassifikator neuartige Verfahren zum Einsatz, wie z.B. der Informationsaustausch zwischen den Kaskadenstufen, „modernere“ Merkmale und das adaptive Skalieren bei der Objektsuche. Diese Verbesserungen ermöglichen sowohl eine höhere Detektionsrate, als auch eine Reduktion des Rechenaufwands. Zur Berechnung der Klassenwahrscheinlichkeit (Fahrzeug oder Hintergrund) wird ein nachgelagertes Neuronales Netz verwendet /16/.

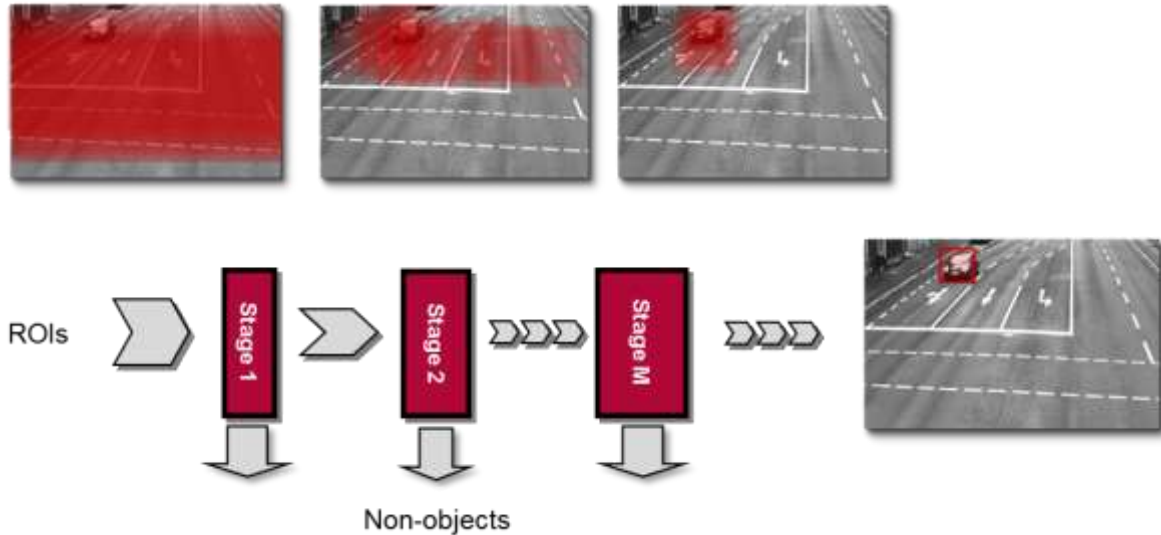


Abbildung 73: Kaskadenstruktur des Fahrzeugdetektors. In jeder Stufe werden Hypothesen verworfen und so die Komplexität reduziert.

3.3.2.4.5 Video: Transformation von Bildkoordinaten zu Weltkoordinaten

Zur Fusion werden die Bilddetektionen in das gleiche Koordinatensystem wie die Lasermessungen transformiert. Hierzu wird die planare Homographie zwischen der Bildebene und der Straßenoberfläche ausgenutzt. Ausgehend von der rechteckigen Detektion in der Bildebene wird der Fußpunkt einer jeden Detektion auf die Straßenoberfläche projiziert. Die Orientierung der Fahrzeuge in Weltkoordinaten wird durch die Orientierung des Fahrstreifens festgelegt. Für die Dimensionen der detektierten Objekte werden realistische Annahmen getroffen.

Abbildung 74 zeigt die Projektion der Bilddetektion auf die Straßenoberfläche.

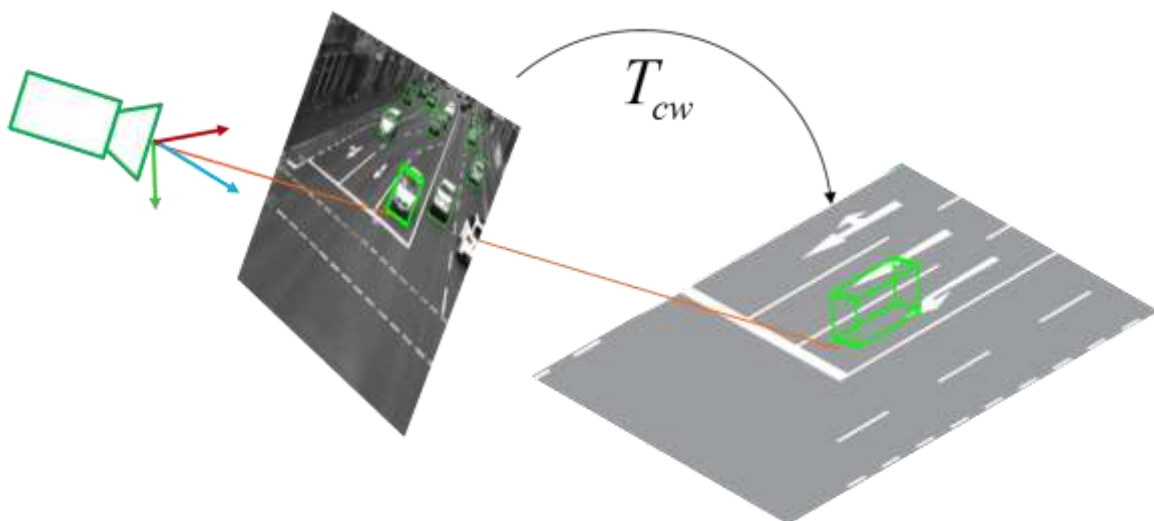


Abbildung 74: Projektion der Bilddetektion auf die Straßenoberfläche zur Bestimmung der Weltkoordinaten

3.3.2.4.6 HD Video: Fußgängerintentionserkennung

Ziel der Fußgängerintentionserkennung ist die möglichst frühzeitige Beantwortung der Frage, ob ein am Fahrbahnrand stehender Fußgänger auf die Straße treten wird („Loslaufen“), ein auf dem Bürgersteig gehender Fußgänger ohne anzuhalten auf die Straße läuft („Durchlaufen“) oder ob ein gehender Fußgänger dicht vor dem Fahrbahnrand oder auf der Straße anhält. Damit verbunden ist eine Schätzung der zu erwartenden Fußgänger-Trajektorie. Diese Verfahren setzen die Fußgängererkennung und -verfolgung voraus.

Die Algorithmenentwicklung wurde in der Anfangsphase des Projekts an der öffentlichen Musterkreuzung mit dem Aufbau einer prototypischen Testanlage sowie mit Laborversuchen eingeleitet. Die Testanlage beinhaltet die Realisierung eines ersten Ansatzes zur Fußgänger-Hypothesenerzeugung mit einem Laserscanner, die Fusion der Hypothesen mit FIR-Videodaten, eine auf *Histogram of Oriented Gradients* (HOG) basierende Merkmalsextraktion und eine mittels *Mixture of Gaussians* (MOG) realisierte Hintergrundsubtraktion. In Kombination mit linearen und Gauß-Kernel *Support Vector Machines* (SVM), die auf den Bildern einer Wärmekamera (320x240 Pixel, 25 Hz) operieren, wird eine kaskadierte, in CUDA (*Compute Unified Device Architecture*) realisierte Videoklassifikation auf einer GPU (*Graphics Processing Unit*) schritthaltend (d.h. in Echtzeit) durchführt. Die Fußgänger-Verfolgung (Tracking) auf Basis eines Kalman-Filters läuft auf einer CPU des Kreuzungsrechners in Echtzeit.

Abbildung 75 illustriert die Struktur des Systems und die eingesetzten Methoden (LIDAR: Laserscanner-Daten; FIR: Videodaten im fernen (thermischen) infraroten Spektralbereich; CPU: *Central Processing Unit*).

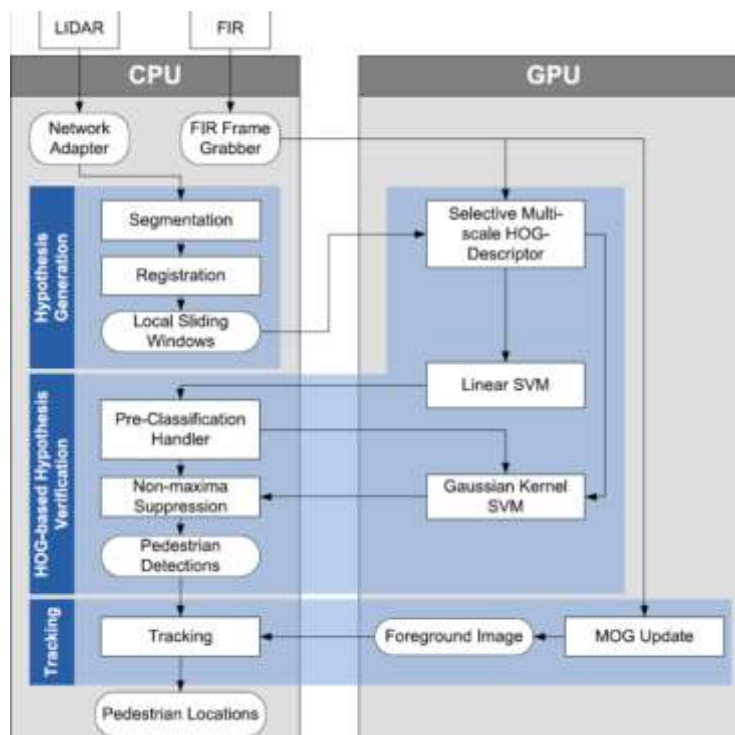


Abbildung 75: Struktur der prototypischen Testanlage mit FIR-Kamera und der darin verwendeten Algorithmen

Bis zur abschließenden Klärung der datenschutzrechtlich korrekten Verfahrensweise an der öffentlichen Kreuzung wurde dort eine Infrarotkamera verwendet, weil sie keine personenbezogenen Daten erzeugt, während an der Versuchskreuzung in Alzenau das hochauflösende, im sichtbaren Spektralbereich arbeitende Videosubsystem getestet werden konnte.

Abbildung 76 zeigt die Anonymisierung im Infrarot-Bild: Gesichter und Kraftfahrzeug-Kennzeichen sind nicht zu erkennen, Fensterglas ist für FIT-Strahlung nicht transparent. Das gemeinsame Blickfeld von Laserscanner und Kamera ist eingerahmt, die erkannten Fußgänger sind mittels blauer Umrahmungen markiert.

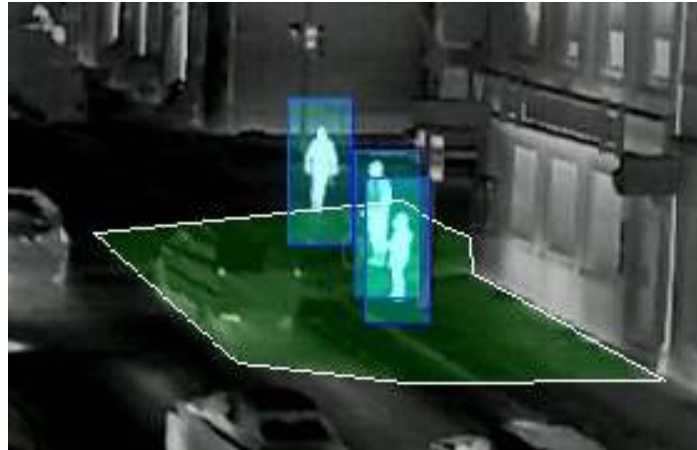


Abbildung 76: Blickfeld der prototypischen Testanlage auf die öffentliche Ko-PER-Kreuzung

Zusammen mit der im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Anonymisierung der Video-Daten wurde – aufbauend auf den Arbeiten in der Anfangsphase – die Intentionserkennung an der öffentlichen Musterkreuzung mit dem hochauflösenden Videosubsystem eingesetzt, das mit einer Bildwiederholfrequenz von 50 Hz im sichtbaren Spektralbereich arbeitet. Zur Fußgängererkennung in Echtzeit werden HOG-Deskriptoren und die SVM-Klassifikation auch auf einem FPGA eingesetzt. Dies erforderte die Entwicklung spezieller Algorithmen zur Berechnung auf dieser Zielhardware.

Zur Erkennung des Loslaufens noch während des ersten Schrittes nutzt ein im Rahmen dieses Projekts neu entwickelter Deskriptor der sog. *Motion History Images* von Konturbildern, um die Körpersprache während der Zeitspanne des Loslaufens zu kodieren. Diese Deskriptoren werden ebenfalls mittels SVM klassifiziert (MCHOG-Verfahren, Abbildung 77). Das Verfahren wurde zunächst auf der Basis von Laborversuchen entwickelt und dann auf die Zielsensorik und die Rechner-Hardware an den Versuchskreuzungen in Alzenau und Aschaffenburg übertragen. Zur Erkennung des Durchlaufens und Abstoppens wird ein *Interacting Multiple Model Extended Kalman Filter* (IMM-EKF) zusammen mit der Positionsinformation eingesetzt. Die Modellübergangswahrscheinlichkeit des IMM-Algorithmus signalisiert den Bewegungszustandswechsel zwischen Laufen und Stehen. Der EKF-Algorithmus linearisiert die Abbildung von Bildpunktkoordinaten einer einzelnen, kalibrierten Kamera auf Positionsdaten in der digitalen Karte der Kreuzung. Durch die Intentionserkennung wird eine Trajektorien-schätzung ausgelöst. Ihr liegt ein Fußgängerbewegungsmodell zugrunde, das sich auf Geschwindigkeitsverläufe stützt, die stückweise linear von der Zeit abhängen. Die zugehörigen Modellparameter wurden anhand einer statistischen Erhebung von Fußgängergeschwindigkeiten an der öffentlichen Musterkreuzung ermittelt.



Abbildung 77: Klassifikation der Loslaufbewegung mit dem MCHOG-Verfahren

3.3.2.4.7 Anonymisierung der Video-Daten

Zu einer für dieses Forschungsprojekt angemessenen Anonymisierung der Videodaten werden im Einvernehmen mit dem Bayerischen Landesbeauftragten für Datenschutz Personenköpfe und Fahrzeug-Kennzeichen zum frühestmöglichen Zeitpunkt noch vor der Daten-Visualisierung und/oder – Speicherung anonymisiert. Dazu werden Kopf- und Nummernschildtracking, Verpixelung sowie eine Kantenfilterung mit einem nachgeschalteten weichzeichnenden Filter eingesetzt. Die Basisalgorithmen hierzu wurden an der nicht öffentlichen Alzenau-

er Versuchskreuzung erarbeitet, die den Auflagen des Datenschutzes im öffentlichen Straßenverkehr nicht unterliegt. Zur Visualisierung des Kreuzungsumfelds in Echtzeit operieren FPGA-basierte Kantenfilterung und Weichzeichnung auf dem Vollbild der HD-Kameras. Aus Abbildung 78 ist ersichtlich, dass KFZ-Kennzeichen im gefilterten Konturbild nicht mehr lesbar sind.



Abbildung 78: Anonymisierte bildliche Echtzeit-Darstellung des Kreuzungsverkehrs an der Versuchskreuzung Alzenau

3.3.2.4.8 Sensorfusion und Umfeldmodell

Nach der Objektdetektion auf Basis der Kreuzungssensoren bestand die nächste Herausforderung darin, ein zuverlässiges und hochgenaues Umfeldmodell der Kreuzung zu erzeugen, auf Basis dessen die Anwendungen in den Ko-PER Fahrzeugen realisiert werden konnten. Zur Übermittlung der jeweils aktuellen Umfeldmodell-Parameter in die Ko-PER Fahrzeuge wurden die in Ko-PER spezifizierten Nachrichtenformate und die in Ko-PER verwendete sim^{TD} CCU genutzt.

Komponenten des Umfeldmodells sind:

- relevante Verkehrsteilnehmer im Erfassungsbereich der Kreuzungssensorik
- die Aktuelle und kommende Ampelphase
- eine hochgenaue digitale Karte der Kreuzung
- azyklische DEN Nachrichten mit Fußgängerinformationen, ausgelöst durch die Fußgängerintentionserkennung

Im Folgenden wird auf die Verfahren und Algorithmen eingegangen, mit denen die einzelnen Inhalte des Umfeldmodells erzeugt wurden.

3.3.2.4.9 Tracking von Verkehrsteilnehmern

Ausgangspunkt für das Verfolgen der Verkehrsteilnehmer im Kreuzungsbereich sind die von den einzelnen Sensorsystemen erkannten Objekte (Abbildung 70). Wie im Abschnitt 3.3.2.4 beschrieben, ergänzen sich die an der Kreuzung verwendeten Sensorsysteme hinsichtlich des Erkennungsvermögens und des Erfassungsbereichs. Diese Gegebenheiten wurden bei der Entwicklung des Fusionssystems, welches aus den einzelnen Objektdetektionen zuverlässige und durchgängige Tracks erzeugt, berücksichtigt. Die Notwendigkeit einer genauen Modellierung des Erkennungsvermögens und des Erfassungsbereichs verdeutlicht das folgende Beispiel.

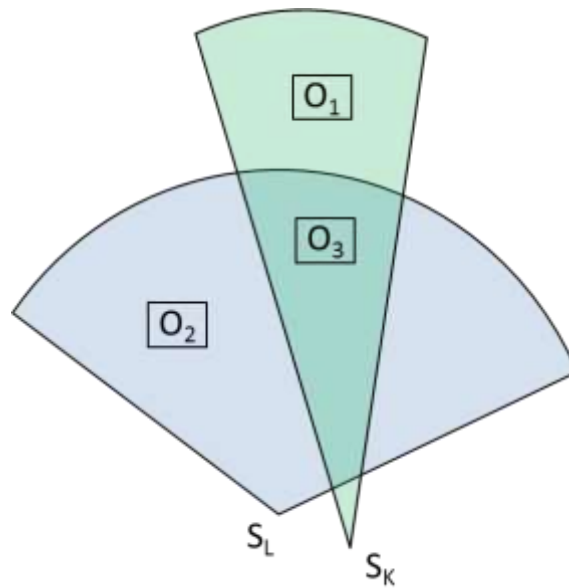


Abbildung 79: Beispiel Sensorfusion

In Abbildung 79 sind die Erfassungsbereiche eines Laserscanners S_L und einer Standardkamera S_K sowie dreier Objekte $O_1 - O_3$ abgebildet. Von den drei Objekten können O_2 und O_3 vom Laserscanner und O_1 und O_3 von der Kamera erfasst werden. Durch die korrekte Modellierung der Erfassungsbereiche wird verhindert, dass z.B. eine Messung der Kamera, die O_2 aufgrund ihres Erfassungsbereichs nicht erkennen kann, die Existenz des Tracks zu O_2 verringert oder den Track gar löscht. Nicht abgedeckt ist hiermit jedoch der Fall, dass sich ein Objekt im Erfassungsbereich von beiden Sensoren befindet, einer von ihnen das Objekt jedoch nicht erkennen kann. Dazu wurde das sensorspezifische Erkennungsvermögen für jeden Sensor eingeführt. Da das Laserscanner-System die Klassen Zweirad, Fußgänger, PKW und LKW erkennen kann und das niedrig auflösende Kamerasystem (SK) nur für die Detektion von LKW und PKW ausgelegt wurde, muss das Erkennungsvermögen beim Einbringen der Sensormessungen berücksichtigt werden. Angenommen es handelt sich bei O_3 um ein Zweirad, so liegt es zwar im Erfassungsbereich der Kamera S_K in Abbildung 79, kann von dieser aber nicht erkannt werden. Dieser Konflikt wird durch die Modellierung der Erfassungsvermögen aufgelöst. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass erst die genaue Modellierung des sensorspezifischen Erfassungsbereichs und Erkennungsvermögens eine korrekte Fusion der komplementären Kreuzungssensoren ermöglicht.

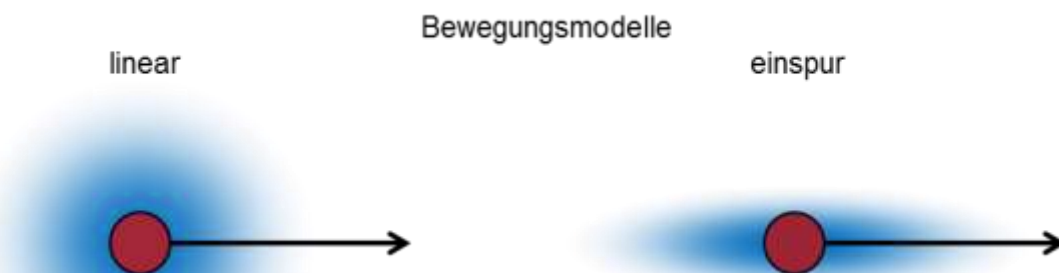


Abbildung 80: Bewegungsmodelle des Multi-Modell Filters

Ein weiterer wichtiger Bestandteil in jedem Trackingsystem ist das Bewegungsmodell der verfolgten Objekte. Da sich die verfolgten Verkehrsteilnehmer grundsätzlich in ihren Bewegungseigenschaften unterscheiden, wird in dem Kreuzungserkennungssystem aus Laserscannern und Standardkameras ein Multi-Modell Ansatz verwendet. Hierbei werden Fußgänger, die sich durch ihre hohe Agilität auszeichnen, mit einem linearen Bewegungsmodell

unter der Annahme konstanter Geschwindigkeit verfolgt. Zweiräder, PKW und LKW werden hingegen mit einem Einspur-Modell konstanter Geschwindigkeit modelliert.

Die Bewegungsmodelle mit ihrem Bewegungsvermögen sind in Abbildung 80 dargestellt. Der blaue Bereich um das durch einen roten Punkt dargestellte Objekt repräsentiert das Bewegungsvermögen bei der durch den schwarzen Pfeil gegebenen Orientierung. Es fällt auf, dass das lineare Modell unabhängig von der Orientierung Bewegungen in alle Richtungen erlaubt. Dies entspricht dem Bewegungsverhalten eines Fußgängers. Bei dem Einspurmodell ist die Bewegungsrichtung an die Orientierung gekoppelt. Damit wird die bei Zweirädern, PKW und LKW nicht mögliche Seitwärtsbewegung modelliert.

Die Wahl des Bewegungsmodells wird demnach über die Objektkasse gesteuert, wodurch eine Klassifikation der Tracks benötigt wird. Hierzu werden die von den Kreuzungssensoren gelieferten Klassifikationsergebnisse fusioniert und weitere Klassenmerkmale, wie z.B. die maximale Geschwindigkeit der Tracks, zur Klassifikation herangezogen.

Ergebnis des Trackings sind schließlich klassifizierte Tracks der Verkehrsteilnehmer, deren Position, Geschwindigkeit, Orientierung und Ausdehnung geschätzt wurde. Im Rahmen von Ko-PER wurde der sog. *Classifying Multiple-Model Probability Hypothesis Density* (CMMPHD) Filter entwickelt, in dem die beschriebenen Funktionen umgesetzt sind. Der CMMPHD Filter wurde in /15/ veröffentlicht.

Die Tracks des Kreuzungsperzeptionssystems werden mittels der iCPM (*intersection Cooperative Perception Message*) an die Fahrzeuge kommuniziert. Die Nachricht beinhaltet neben den Perzeptionsdaten auch die georeferenzierten Koordinaten des Kreuzungsursprungs im WGS84 (*World Geodetic System 1984*) und Gültigkeitszeitstempel der Daten in UTC (*Coordinated Universal Time*).

3.3.2.4.10 Ampelinformationen und digitale Karte

Zum Versenden der Ampelinformationen wurde an der Kreuzung Aschaffenburg die SPaT Nachricht implementiert und mittels eines simulierten Ampelsteuergeräts getestet.

Für die frühzeitige Erkennung von Gefahrensituationen war eine genaue und zuverlässige Prädiktion der Fahrzeugtrajektorien im Kreuzungsumfeld erforderlich. Um diese Anforderung zu erfüllen, basiert die Trajektorienprädiktion unter anderem auf einer hochgenauen digitalen Karte, zu der die Kreuzungsobjekte zugeordnet werden können. Diese entsprechende Karte wurde von der Kreuzung im Format der sog. MAP-Nachricht versandt.

3.3.2.4.11 Azyklische Nachricht mit Fußgängerinformationen

Um besonders zeitnah auf kritische Situationen mit Fußgängern reagieren zu können, wurde in Ko-PER die azyklische PED Nachricht definiert. Sie wird gesendet, wenn das in Abschnitt 3.3.2.4.6 erläuterte Modul zur Fußgängerintentionserkennung eine Gefahrensituation für einen Fußgänger detektiert. Ist dies der Fall, so wird die prädizierte Trajektorie des Fußgängers zusammen mit seiner globalen Position mittels der PED Nachricht im Broadcast-Modus kommuniziert.

3.3.3 Ergebnisse

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Ausstattungsmerkmale und die damit erzielte Funktionalität der Versuchskreuzungen sowie über die Güte der in Ko-PER entwickelten Algorithmen zur Erkennung und Verfolgung von Verkehrsteilnehmern und zur Intentionserkennung von Fußgängern. Die Arbeiten wurden auf nationalen und internationalen Workshops und Konferenzen publiziert und mit mehreren *Best Paper Awards* ausgezeichnet.

3.3.3.1 Aufbau und Betrieb der Versuchskreuzungen

Durch den Aufbau der Versuchskreuzungen in Ulm, Alzenau und Aschaffenburg, die auch in dieser Reihenfolge in Betrieb genommen wurden, standen dem Projekt drei Testgelände mit ansteigendem Komplexitätsgrad der Hardware-Ausstattung zur Verfügung.

Die Testkreuzung in Ulm war die erste im Projekt ausgestattete Kreuzung und diente damit als Muster für den Aufbau der beiden anderen Kreuzungsperzeptionssysteme. Die Ulmer Kreuzung wurde mit 2 Laserscannern und 2 Standardkameras, einer proprietären Synchronisationshardware mit GPS-Modul und CAN-Anbindung (SyncBox) zur hardwarebasierten Datensynchronisation, einem Rechner für die Datenverarbeitung sowie einer Kommunikationseinheit (RCCU) ausgestattet. Neben dem Eignungstest dieser Komponenten für den Einsatz an den deutlich komplexeren Kreuzungen in Alzenau und Aschaffenburg, wurden auch Prototypen für die Sensorhalterungen und das Verkabelungsmanagement entworfen. Aufgrund der räumlichen Nähe zum MRM der Universität Ulm, dem im Rahmen von Ko-PER der Entwurf und die Erprobung der Algorithmen zur Kreuzungsperzeption mit Standardkameras und Laserscannern oblag, konnten neu entwickelte Methoden zur räumlichen und zeitlichen Sensorkalibrierung und Objekterkennung ohne unnötigen Aufwand direkt an der Ulmer Kreuzung getestet werden.

Die Versuchskreuzung in Alzenau wurde mit 8 Laserscannern, 5 VGA Kameras, 2 hochauflösenden Kameras, einer SyncBox, einer mobilen Kreuzungsrechneranlage mit 4 Rechnern sowie der Infrastruktur zur Energieversorgung und Datenübertragung (RCCU) ausgerüstet. Abbildung 81 und Abbildung 82 visualisieren beispielhaft Ergebnisse zur Genauigkeit der großvolumigen 3D-Kalibrierung des hochauflösenden Video-Subsystems, zur Objekterkennung mit den Laserscannern und zur Kreuzkalibrierung der Video-Kameras. An der Alzenauer Kreuzung liefert die Triangulation im Zentralbereich des Bildes 3D-Koordinaten mit einem Messfehler < 10 cm. Abbildung 82 zeigt das vom Laserscanner-System ermittelte Volumen des erkannten Objekts. Es wurde anhand der Kreuzkalibrierung in Bildpunktkoordinaten der hochauflösenden Kamera transformiert.



Abbildung 81: Evaluationsbeispiel zur Kalibrierung der hochauflösenden Kameras an der Kreuzung Alzenau



Abbildung 82: Laserscanner-Hypothese im Bild der hochauflösenden Kamera an der Kreuzung Alzenau

An der öffentlichen Kreuzung in Aschaffenburg werden insgesamt 24 kreuzkalibrierte Sensoren (14 Laserscannern, 8 VGA-Kameras und 2 HD-Kameras) betrieben. Ferner umfasst die Ausstattung ein DGPS-Modul mit Antenne, eine SyncBox, ein LSA-Steuergerät mit Ethernet-Anbindung sowie die Infrastruktur zur Energieversorgung, Datenübertragung (RCCU) und Synchronisation und die Einbindung der Kreuzungsrechenanlage mit 5 Rechnern. Ein kreuzungsnah gelegener Laborraum der Hochschule Aschaffenburg, aus dem die Kreuzung einsehbar ist, wurde als Kontrollzentrum der Kreuzung eingerichtet. Die Montagepositionen der Sensorik wurden zur Reduktion möglicher Verdeckungen in 6 bis 10 Metern Höhe bei teilweise überlappendem Beobachtungsbereich gewählt. Positionen und Ausrichtung wurden zunächst durch Simulation ermittelt und dann vor Ort per Feinjustage festgelegt. Abbildung 83 zeigt schematisch die Systemarchitektur, Abbildung 84 die abschließend gewählten Gesichtsfelder aller Video-Sensoren. Das Gesamtsystem ist nach einer Analyse der GIDAS-Daten so ausgelegt, dass es gestattet, 75% der potenziellen Szenarien aller schweren und tödlichen Kreuzungsunfälle zu erfassen. Im Stereovolumen des hochauflösenden Videosubsystems wird an der öffentlichen Kreuzung eine 3D-Koordinatengenauigkeit von 3 cm erreicht /1/.

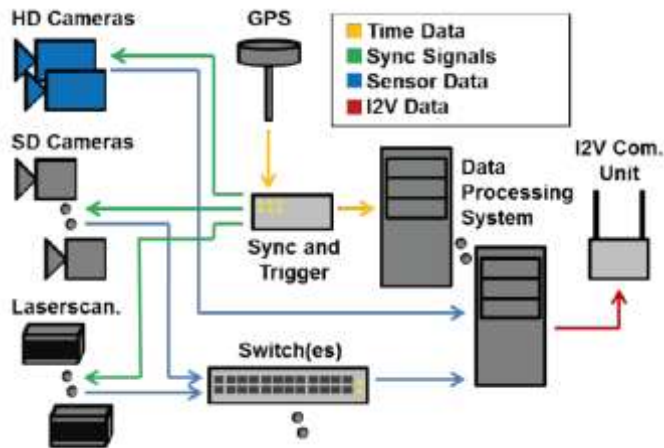


Abbildung 83: Systemarchitektur der öffentlichen Kreuzung Aschaffenburg



Abbildung 84: Gesichtsfelder der Video-Kameras an der öffentlichen Musterkreuzung

3.3.3.2 Arbeiten zur Kreuzungsperzeption

Um die Ko-PER Assistenz an der Kreuzung Aschaffenburg realisieren zu können, musste eine zuverlässige Detektion der Verkehrsteilnehmer sowohl im Kreuzungszentralbereich als auch bis weit hinein in die Kreuzungszufahren gegeben sein. Abbildung 85 zeigt eine Auswertung der Leistungsfähigkeit bei der Detektion von Kraftfahrzeugen sowohl für das Video als auch für das Lasersystem. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass sich der Detektionsbereich des Kreuzungsperzeptionssystems auf der Würzburger Straße bis ca. 70 m und auf der Spessartstraße bis ca. 40 m erstreckt. Damit ist es möglich, die Zustände, wie Position und Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer schon weit vor dem Erreichen der Kreuzung zu schätzen.

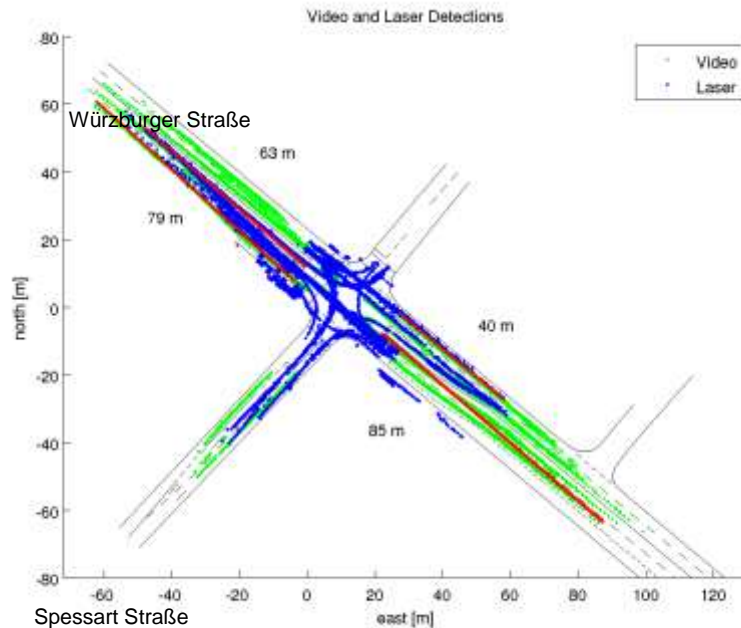


Abbildung 85: Detektionsreichweite der Video- und Lasersensoren für Kraftfahrzeuge; in Rot sind die ab der Haltelinie gemessenen Reichweiten der unterschiedlichen Systeme dargestellt.

In Abbildung 86 ist ein beispielhaftes Ergebnis der Kreuzungsperzeption dargestellt. Hierin bestätigt sich die Aussage, dass die Verkehrsteilnehmer schon in den Kreuzungszufahrten vom Perzeptionssystem verfolgt werden.

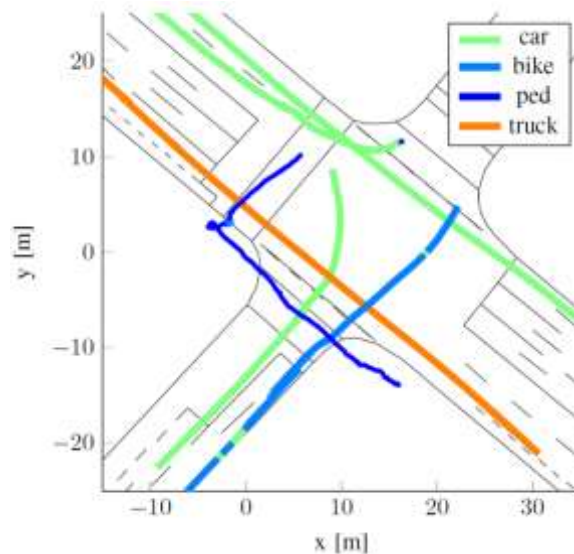


Abbildung 86: Beispielhaftes Ergebnis des Kreuzungstracking; Tracks eines Radfahrers, Fußgängers, LKW und mehrerer PKW

Zudem ist durch die Farbkodierung der Objektklassen visualisiert, dass die Fusion der Klassifikationsergebnisse der Sensorsysteme zu einem zuverlässigen Schätzergebnis für die Klasse der Objekte führt. Der glatte und durchgehende Verlauf der Trajektorien in Abbildung 86 lässt auf ein konsistentes Trackingergebnis mit hoher Güte schließen. Durch Auswertungen mit Referenzdaten wurde ermittelt, dass der mittlere Positionsfehler bei der Verfolgung von Fußgängern unter 15 cm, der von Zweirädern unter 35 cm und der von Fahrzeugen unter 50 cm liegt. Zudem liegt bei Fahrzeugen der mittlere Schätzfehler der Geschwindigkeit unter 0,7 m/s und der der Orientierung unter 3,5 Grad. Aufgrund der ermittelten absoluten

Fehler ist eine fahrstreifengenaue Lokalisierung der Verkehrsteilnehmer möglich und damit eine zentrale Anforderung der in Ko-PER entwickelten Situationsanalyse erfüllt.

Zur Bewegungsmustererkennung von Fußgängern, welche auf die Intention zur Querung der Straße schließen lässt, wurde in der Anfangsphase des Projekts mit der prototypischen Testanlage, die mit den Bildern einer Infrarotkamera (320x240 Pixel, 25 Hz) in Echtzeit arbeitet, zur Erkennung und Verfolgung von Fußgängern eine Bildbearbeitungs-Zykluszeit von 21 ms erreicht, was einer Bildfrequenz von 48 Hz entspricht. Dazu wurden eine NVIDIA GeForce 480 GTX GPU und eine Intel i7-920 CPU (4 Kerne, 2,66 GHz) eingesetzt. Die erzielte Detektionsrate des Systems beträgt 94,5 % /2/.

Die entwickelten Klassifikations- und Tracking-Verfahren wurden im weiteren Projektverlauf auf das hochauflösende Videosubsystem übertragen, das bei einer Auflösung von 1128x752 Pixeln und einer Bildfrequenz von 50 Hz im sichtbaren Spektralbereich arbeitet (s.a. Abbildung 87).

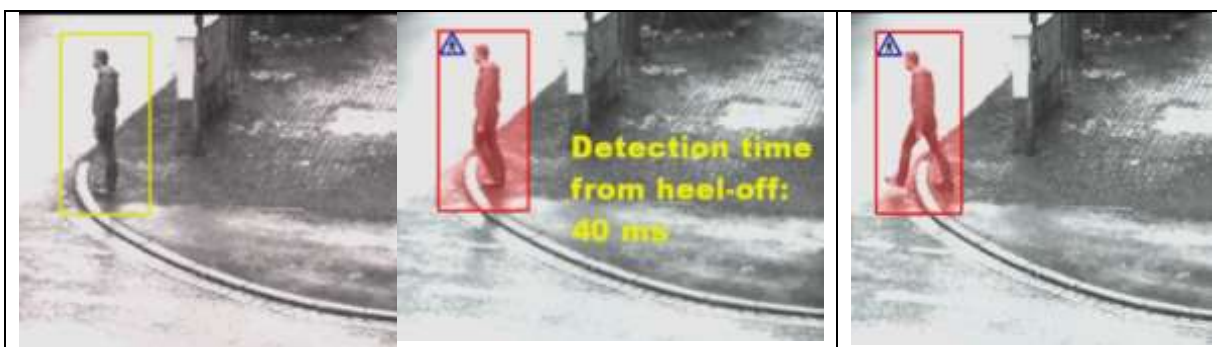


Abbildung 87: Erkennung der Loslaufbewegung eines Projektmitarbeiters aus Sicht der hochauflösenden Kamera HK1 an der öffentlichen Kreuzung

Die Bewegungsmustererkennung auf Basis des MCHOG-Verfahrens erkennt mit einer Zuverlässigkeit (*Accuracy*) von 99%, ob ein am Straßenrand stehender Fußgänger losläuft. Mit sechs aufeinanderfolgenden Bildern wird die Entscheidung bereits mit einer Zuverlässigkeit von 80% erreicht /3/, Abbildung 88). Unter Einbezug des IMM-EKF-Verfahrens kann das System auch für die Intentionserkennung ausschließlich mit Laserscannern konfiguriert werden; auch eine Erkennung des (Wieder-) Stehenbleibens und des ohne Anhalten vom Bürgersteig auf die Straße Laufens ist möglich. Schließlich kann anhand der Parameterwahl ein *Trade-off* zwischen Erkennungsleistung und Verarbeitungsgeschwindigkeit eingestellt werden /4/.

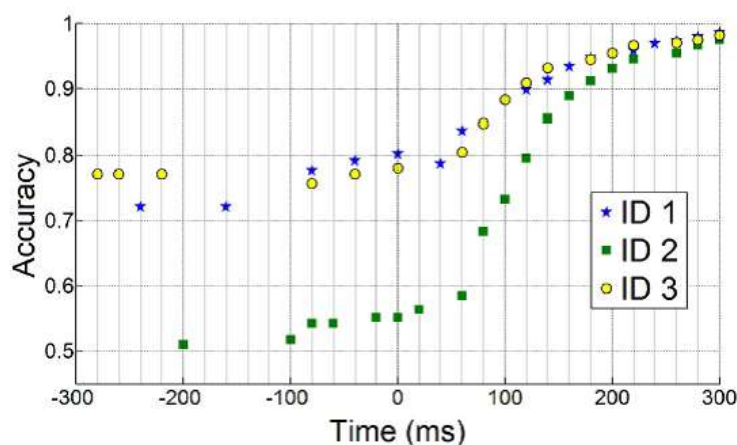


Abbildung 88: Zeitlicher Verlauf der mittleren Genauigkeit relativ zum manuell gelabelten *Heel-Off*

Mit der Erkennung des Loslaufens wird eine Fußgänger-Trajektorien-Schätzung für einen Vorhersagezeitraum von etwa 3 Sekunden möglich. Dieser Vorhersagezeitraum entspricht –

wie an anderer Stelle im Rahmen des Projekts empirisch ermittelt – derjenigen Vorwarnzeit, die der Fahrer eines Kraftfahrzeugs für eine eigenständige Reaktion als angemessen bewertet. Zur Implementierung der Algorithmen wurde eine umfassende video-basierte Studie zu Trajektorien erwachsener Personen an der öffentlichen Ko-PER Versuchskreuzung in Aschaffenburg durchgeführt. Die mit dem hochauflösenden Kamerasubsystem erzielbare Erkennung und Verfolgung wurde mit Hilfe von Markern an instruierten Studenten einerseits und anonymisierten detektierten Köpfen öffentlicher Fußgänger andererseits ausgewertet (Abbildung 89). Das blaue Rechteck umgrenzt den Oberkörper des Fußgängers, die konzentrischen Kreise repräsentieren die aktuell detektierte Kopfposition. Die kurze, waagrecht verlaufende, orange gefärbte Linie markiert die seit dem Loslaufen beobachtete Kopfbahn. Die geschätzten Positionen des Kopfs ab dem Abheben der Ferse sind im Zeitabstand von jeweils 200 ms durch die blauen Punkte markiert. Die blauen vertikalen Linien zeigen die zugehörigen erwarteten Bodenpunkte der Trajektorie.



Abbildung 89: Visualisierung der Kopfverfolgung

Als weiteres Ergebnis stehen statistische Daten zum Geschwindigkeitsverlauf der Bewegung zur Verfügung, die vom Abheben der Ferse während des Loslaufens bis zu einer Bewegungszeit von etwa 3 s reichen (Abbildung 90). Daraus wurde für den Geschwindigkeitsverlauf ein stückweise lineares Geschwindigkeitsmodell abgeleitet, welches die Grundlage für die Trajektorienberechnung liefert, die parametrisiert per iDEN in Echtzeit zur Verfügung gestellt wird. Auf dieser Basis liegt der mittlere durch die Fußgängerbewegung gegebene Positionsschätzfehler im Vorhersagezeitraum bis 2,4 s unter 26 cm /5/.

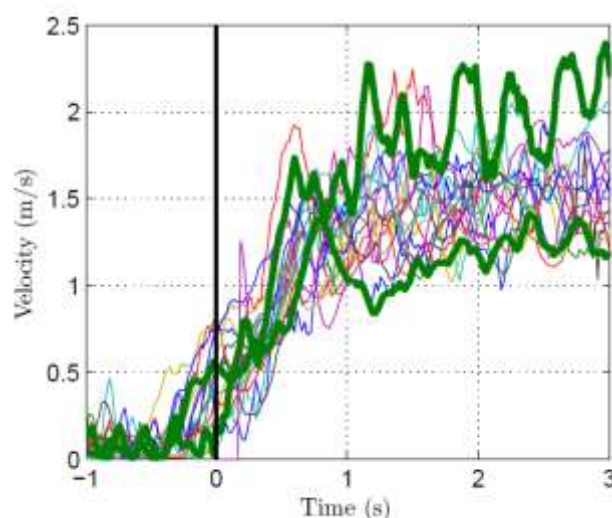


Abbildung 90: Ergebnisse der Kopfverfolgung

Um die Algorithmen des hochauflösenden Videosubsystems echtzeitfähig zu halten, wurden sowohl effiziente Algorithmen /6/ als auch – aufbauend auf den Arbeiten /7/ und /8/ – neue Methoden zum Einsatz von FPGAS entwickelt /9/, /10/. Die Kernmerkmale des Entwicklungsstands zum Ende des Ko-PER Projekts sind: Bearbeitung der Bilddaten mit doppelter Pixelfrequenz und Normierung der HOG-Blöcke mit der L1-Sqrt-Norm. Dadurch wird eine effektive Ressourcen-Nutzung erreicht. Die Implementierung erlaubt in Verbindung mit einem Time-Multiplex Verfahren die parallele Berechnung mehrerer Skalen über Ressourcengrenzen hinaus. 64 HD-Bilder (1920 x 1080 Pixel) können pro Sekunde in 18 Skalen mit einer Latenz von weniger als 150 μ s verarbeitet werden. 1,79 Millionen HOG-Deskriptoren können pro Sekunde und Skala berechnet werden. Diese Verarbeitungsgeschwindigkeit übersteigt zum Zeitpunkt der Veröffentlichung bekannte Implementierungen um den Faktor vier /11/.

3.3.3.3 Echtzeit-Präsentation

Dass die Kreuzungsperzeption und Fußgängerintentionserkennung die Verkehrsteilnehmer in Echtzeit, d.h. schritthaltend mit den Messzyklen der Sensoren, in der erforderlichen Güte erkennen und verfolgen und Warnmeldungen kommunizieren kann, wurde im Rahmen der Ko-FAS Abschlusspräsentation gezeigt. Hier stützten sich die live gezeigten Assistenzfunktionen der Partner BMW, CSEI, DAI und MRM teilweise oder ausschließlich auf die kommunizierten Kreuzungsdaten.

3.4 Drahtlose Kommunikation (AP 2.700)

3.4.1 Aufgabenstellung und Zielsetzungen

Der Straßenverkehr kann durch drahtlose Kommunikation sicherer gestaltet werden. Dabei spielt die rechtzeitige Wahrnehmung der anderen Verkehrsteilnehmer eine entscheidende Rolle. Bedingt durch die Vielzahl der Kommunikationspartner kann die Informationsübermittlung durch Kommunikation selbst zu einem Engpass bei der Realisierung des Ko-PER Systems werden. Entsprechend sorgfältig sind die Anforderungen an die Kommunikation zu formulieren. Durch die Festlegung auf eine spezifische Kommunikationstechnologie ergeben sich bestimmte Randbedingungen, die von den Ko-PER Applikationen einzuhalten sind.

Die Anforderungen an das Kommunikationssystem gliedern sich in folgende vier Bereiche:

- *Kanalkapazität*
Ermittlung der Kanalkapazität der verwendeten Kommunikationseinrichtung bzw. des verwendeten Standards unter Berücksichtigung der EU-Frequenzfreigabe.
- *Übertragungsgüte*
Ermittlung der erreichbaren Kommunikationsdistanz und Paketfehlerraten.
- *Datendefinition*
Sammlung der durch Broadcast zu übertragenden Objektdaten von der Kreuzung in die Fahrzeuge (I2V); Korrekturdaten von der Kreuzung.
Festlegung der Daten für kooperative Manöver auf der Strecke (V2V). Überlegungen zum Datenformat und zur Paketierung, Segmentierung und Datenreduzierung.
- *Zeitverhalten*
Konzept/Systemanforderung für das parallele oder zeitgesteuerte Übertragen von Kreuzungsdaten (I2V) und Austausch von Daten der Fahrzeuge untereinander (V2V), jeweils im sog. Broadcast Modus.

Im Fördervorhaben Ko-PER sollten nicht nur sim^{TD}-Kommunikationsgeräte (CCU), sondern nach Möglichkeit auch sim^{TD}-Kommunikationsprotokolle Anwendung finden. Dazu waren die Analyse der für Ko-PER relevanten sim^{TD}-Nachrichtentypen und ihrer Eigenschaften erforderlich.

3.4.2 Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

In Ko-PER wird die CCU als Modem mit folgenden Eigenschaften genutzt:

- Kommunikationstechniken: ITS-G5 (802.11p), UMTS, WLAN 802.11b/g
- Ethernet-Schnittstelle zum Anwendungsrechner
- CAM, SPaT und MAP Nachrichten sowie Ko-PER-spezifische Nachrichten

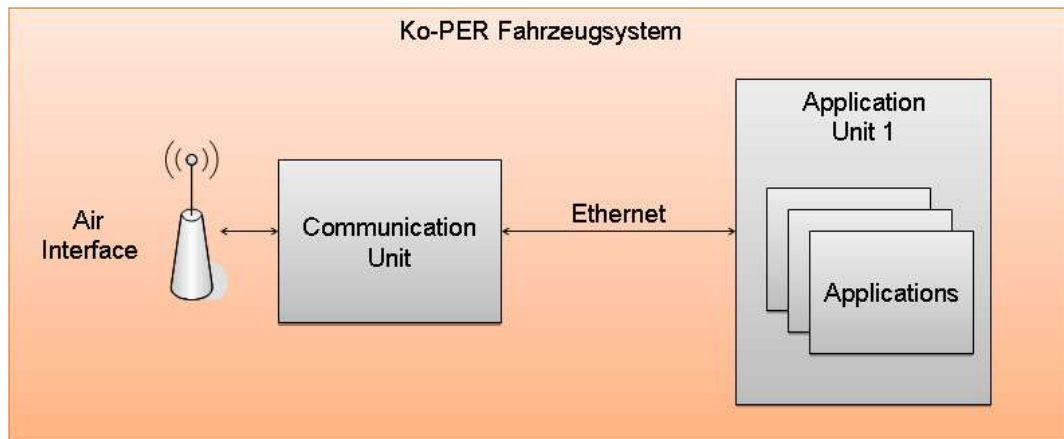


Abbildung 91: Ko-PER Fahrzeug-Kommunikationssystem

Die CCU orientiert sich an der aktuellen Standardisierung bei ETSI. Der ETSI Standard ETSI ES 202 663 beschreibt ITS-G5, d.h. die Verwendung von IEEE 802.11p in Europa. Für sicherheitsrelevante Anwendungen der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation steht europaweit das Frequenzband 5.875 GHz bis 5.905 GHz zur Verfügung. Dieses Band ist in drei Kanäle zu je 10 MHz Bandbreite geteilt.

- SCH1 – Servicekanal 1
- SCH2 – Servicekanal 2
- CCH – Kontrollkanal

Für Ko-PER sind nur der SCH1 (5.875 - 5.885 GHz) und der CCH (5.895 - 5.905 GHz) interessant. Für ITS-G5 ist vorgeschrieben, dass permanent auf dem Kontrollkanal gehört werden muss, sofern nicht selbst gesendet wird.

Auf dem Kontrollkanal werden (u.a.) die folgenden Daten übertragen:

- CAM
- Aperiodische Emergency Nachrichten (DENM), darunter auch Ko-PER spezifische
- Periodische Ko-PER-spezifische Nachrichten

3.4.2.1 Kanalkapazität

Der erreichbare Datendurchsatz (*throughput*) bei ITS-G5 hängt von der gewählten Datenrate und der (mittleren) Paketgröße ab. Dies berücksichtigt allerdings nicht den Einfluss von *Hidden Stations*, *Congestion Control* und Kanalzugriffszeiten.

Zugunsten einer kurzen Kanalzugriffszeit regelt das *Congestion Control* von ITS-G5 die Kanalbelegung und damit den erreichbaren Datendurchsatz auf vorgegebene Werte ab. Im C2C-CC (siehe Referenz /17/) wurden in Übereinstimmung mit Untersuchungen in SAFESPOT (vgl. /18/) und der aktuellen Standardisierung bei ETSI (*Congestion Control*) folgende *Richtwerte* für die Kanalbelegung festgelegt (Tabelle 14):

Kanal	Channel Load	Channel Capacity (6 Mbit/s)
CCH	25 %	1,5 Mbit/s
SCH1	40 %	2,4 Mbit/s

Tabelle 14: Kanalbelegung und Kanalkapazität

Auf dem Service Kanal SCH1 werden eine höhere Paketverlustrate und eine höhere Verzögerung in Kauf genommen, da keine Emergency Nachrichten übertragen werden. Als Standarddatenrate für die Kanäle CCH und SCH1 wurde 6 Mbit/s festgelegt. Damit ergeben sich die ebenfalls in Tabelle 14 eingetragenen *Richtwerte* für die Kanalkapazität.

Die Kanalkapazität sollte möglichst fair zwischen allen Fahrzeugen und der Kreuzung aufgeteilt werden. Eine Abschätzung des Datenaufkommens bei 100 Fahrzeugen mit einer CAM-Rate von 2 Hz und einer mittleren Paketlänge von 360 Bytes ergibt eine Kanalbelegung von ca. 9,6%. Dies entspricht bereits ca. 40% der Kanalkapazität, die sich aus dem Richtwert von 25% Kanalbelegung auf dem Kontrollkanal ergibt.

Auch die ITS-Stationen der Kreuzung (IRS) versenden Nachrichten. Neben den von der Kreuzung selbst wahrgenommenen Objektinformationen werden die von den Fahrzeugen empfangenen CAM Nachrichten den entsprechenden Objekten zugeordnet. Die IRS geben ihre Informationen ggf. nach Datenfusion an die Fahrzeuge weiter. Die IRS nehmen somit in Ko-PER eine zentrale Rolle ein. Dies spiegelt sich in einem erhöhten Sendevolumen der IRS gegenüber den Fahrzeugen (IVS) wider.

Im einfachsten Fall beansprucht eine IRS einen Anteil an Kanalkapazität entsprechend von n Fahrzeugen. In die Zahl n geht neben dem Datenaufkommen auch eine Vergrößerung der Reichweite ein, falls die IRS mit erhöhter Sendeleistung sendet. A priori ist die Zahl n nicht bekannt. Andererseits wird das Ko-PER System für eine Anzahl von N Fahrzeugen (z.B. $N=100$) ausgelegt. Unter der Maßgabe dass die IRS nur einen gewissen Bruchteil ρ der Kanalkapazität belegen darf, kann n mit $n = \rho \cdot N / (1-\rho)$ abgeschätzt werden. So ergibt sich beispielsweise $n=50$ für $N=100$ und $\rho=33,3\%$.

Dabei sind Zielkonflikte zwischen Kanalbelegung, Reichweite, Priorität und Zahl der Fahrzeuge zu berücksichtigen.

3.4.2.2 Übertragungsgüte (Fehlerraten)

Die erzielbare Reichweite der Kommunikation ist eine wesentliche Größe für die Qualität des Systems. Für eine Manöverunterstützung auf der Strecke außerhalb der Stadt sollte die Reichweite für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in der Größenordnung von 100-300 m liegen. Im Kreuzungsbereich in der Stadt sind die erzielbaren Reichweiten der Infrastruktur-Fahrzeug-Kommunikation wesentlich durch die freie Sicht zwischen den Antennen (ohne nennenswerte Abschattungen) aber auch durch Reflektionen gegeben. Die notwendigen Reichweiten liegen hier in der Größenordnung von 100 m.

Die Fehlerrate muss hinreichend gering sein, um die Funktion bzw. Anwendung nicht zu gefährden. Die notwendige Paketfehlerrate wird mit kleiner als 10 % angenommen.

3.4.2.3 Datendefinition

Im Fördervorhaben Ko-PER sollen nicht nur die sim^{TD} -Kommunikationsgeräte, sondern soweit möglich auch die sim^{TD} -Kommunikationsprotokolle Anwendung finden. Dazu war zunächst die Analyse der für Ko-PER relevanten sim^{TD} -Nachrichtentypen und ihrer Eigenschaften erforderlich. Im darauffolgenden Schritt war die Identifikation der aus Sicht von Ko-PER nicht erfüllten Anforderungen an die bereits verfügbaren Nachrichtenformate erforderlich. Aus Kompatibilitätsgründen zum sim^{TD} -System konnten die existierenden sim^{TD} -Nachrichten nicht modifiziert werden, so dass für Ko-PER neue spezifische Nachrichtentypen definiert und eingesetzt wurden.

Dies betrifft insbesondere Ko-PER relevante Nachrichtentypen zur Übermittlung der kreuzungs- und fahrzeugspezifischen Perzeptionsergebnisse sowie den Informationen bzw. Ergebnissen zur kooperativen Lokalisierung (kooperative, GNSS basierte Lokalisierung). Konkret handelt es sich dabei um die sog. CPM (*Cooperative Perception Message*) und CLM (*Cooperative Localization Message*).

3.4.2.3.1 Daten der Kreuzung

Im Kreuzungsbereich werden folgende Daten von der *ITS Roadside Station* (IRS) kommuniziert:

- MAP – Kreuzungstopologie
- CLM – Daten zur kooperativen Ortung (Ko-PER spezifischer Nachrichtentyp)
- SPaT – Status Lichtsignalanlagen
- iCPM – Objektdaten der Kreuzungsperzeption (Ko-PER spezifischer Nachrichtentyp)

3.4.2.3.2 Daten der Fahrzeuge

Im Bereich des Längsverkehrs werden folgende Daten von den *ITS Vehicle Stations* (IVS) kommuniziert:

- CAM – Cooperative Awareness Message
- vCPM – *Vehicle Cooperative Perception Message* (Ergebnisdaten des Fahrzeug lokalen Perzeptionssystem)
- vCLM – *Vehicle Cooperative Localization Message* (Satelliten-Rohdaten zur Verbesserung GNSS-basierter Relativpositionierung)
- SVC – Ko-PER definierte DEN Message „*Sudden Velocity Change*“
- SLD – Ko-PER definierte DEN Message „*Sudden Lateral Displacement*“

3.4.2.3.3 Datenformate

Aus sim^{TD} werden neben der CCU folgende Nachrichtenformate übernommen:

- CAM – *Cooperative Awareness Message*
- SPaT – *Signal Phase and Timing* (Message)
- MAP – Topologie-/Geometrienachricht
- DENM – Das Schema der *Decentralized Environmental Notification Message*

In Ko-PER wurden zusätzlich folgende Datenformate spezifiziert:

- iCPM – *infrastructure Cooperative Perception Message* und die
- vCPM – *vehicle Cooperative Perception Message* jeweils mit den 3 Unterstrukturen
 - EIS – *Ego Information Structure*
 - PDO – *Perceived Dynamic Object* und
 - PSO – *Perceived Static Object*
- CLM – *Cooperative Localization Message* (Fahrzeug und Kreuzungsbake)
- Ko-PER definierte DEN Message der Typen
 - SVC – „*Sudden Velocity Change*“ und
 - SLD – „*Sudden Lateral Displacement*“ (in drei Ausprägungen)

Im Bereich ausgestatteter Kreuzungen wird die iCPM von der IRS ausgesendet. Sie beinhaltet eine Liste dynamischer Objekte die von der Kreuzung wahrgenommen werden samt deren Eigenschaften. Dabei werden nur solche Objektdaten übertragen, die von der IRS als situationsrelevant eingestuft werden.

Außerhalb ausgestatteter Kreuzungen wird die vCPM von den IVS ausgesendet. Sie beinhaltet eine Liste dynamischer Objekte und Ihrer Eigenschaften wie sie vom sendenden Fahrzeug wahrgenommen werden. Dabei werden nur solche Objektdaten übertragen, die von der IVS als situationsrelevant eingestuft werden.

Die Inhalte der einzelnen Nachrichten sind in dem öffentlichen Dokument „Ko-PER spezifische Nachrichteninhalte...µMS 2.720-2“, beschrieben und stehen per Ko-FAS Web-Site zusammen mit den zugeordneten ASN.1 Code zum Download bereit – vgl. [58].

Die Nachrichteninhalte werden per Luftschnittstelle ASN.1 kodiert übertragen.

3.4.2.4 Zeitverhalten

3.4.2.4.1 Aussendung der CAM

In Ko-PER wird von den Applikationen eine CAM-Rate von bis zu 10 Hz angeregt, da sie insbesondere die Positionen der Fahrzeuge enthalten. Diese Rate wird zentral eingestellt.

- *Empfängerseitige Berechnung der Trajektorien der Fahrzeuge und Extrapolation der jeweiligen Fahrzeugpositionen.*
- *Aussendung von DEN bei abrupten Fahrmanövern, falls die Extrapolation zu nicht tolerierbaren Fehlern führt.*

3.4.2.4.2 Latenzanforderung DEN

Im Gegensatz zur CAM werden die DEN Nachrichten unverzüglich gesendet. Die durch die Kommunikation verursachte Verzögerung beträgt nur wenige Millisekunden (~1 -2 ms) sofern die Richtwerte der Kanalbelegung (Tabelle 14) eingehalten werden. Die Latenzen durch Paketzusammenstellung im Sender und der Paketauswertung bei Empfang können allerdings ein Vielfaches davon betragen.

Die Verzögerung, die durch Kommunikation entsteht, ist im Fall der DEN gegenüber den Verzögerungen bei der Auswertung vernachlässigbar.

3.4.2.4.3 Zeitanforderungen vCPM

In den meisten Fällen ist die Aussendung von vCPM nicht zeitkritisch. Wenn im beobachtenden Fahrzeug eine Situation als zeitkritisch eingeschätzt wird, kann die entsprechende Information mittels DEN übertragen werden. Allerdings ist die empfängerseitige Kritikalität einer Situation senderseitig nicht immer feststellbar. Aus diesem Grund, vor allem aber wegen der Erfordernisse der fahrzeugübergreifenden Informationsfusion ist für die CPM eine Wiederholrate von 10 Hz erforderlich oder zumindest wünschenswert.

3.4.2.4.4 Zeitanforderungen Kreuzungstopologie MAP

Die Übertragung der Kreuzungstopologie ist nicht zeitkritisch. Wenn sie direkt von der Kreuzung (z.B. auf einem Servicekanal) übertragen wird, genügt es, die Information mit einer Rate $r_{\text{MAP}} \approx 1$ Hz zu senden. Dann erhalten sie alle Fahrzeuge, die sich der Kreuzung nähern, rechtzeitig.

3.4.2.4.5 Zeitanforderungen iCPM

Hierfür gelten die zu den Zeitanforderungen vCPM getroffenen Aussagen.

3.4.2.4.6 Latenzanforderung CLM

Die Latenz bei der Kommunikation der CLM soll auf ca. 20 ms beschränkt bleiben. Die Latenz, die von der Kommunikation selbst verursacht wird ist i.d.R. deutlich kleiner als 20 ms, allerdings kann die Verzögerung durch endliche Prozessorleistung bei der Paketzusammenstellung im Sender und Paketauswertung im Empfänger ein Vielfaches davon betragen. Ebenso ergibt sich durch die Zusammenfassung von vCPM und vCLM, die dann eine gemeinsame Rate von ca. 10 Hz besitzen, eine „Latenz“ von 100 ms.

Demzufolge sprechen die Latenzanforderungen der CLM für die Aussendung eigener CLM Pakete, da andere Pakete der IRS i.d.R. keine derartigen Zeitanforderungen aufweisen. Dann ist allerdings ein gewisser Overhead einzurechnen für Kanalzugriff, Header und Security.

3.4.3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sind Ergebnisse aus Messkampagnen zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Kommunikationsparameter bewertet um die Erfordernisse der Anwendungen an die Kommunikationssysteme sicherzustellen.

3.4.3.1 Kommunikationsreichweite / Antennencharakteristik

Die fehlerfreie Fahrzeuginstallation und Funktionsüberprüfung erfolgte für jedes Ko-PER-Versuchsfahrzeug einzeln. Untersucht wurde die Kommunikationsreichweite und Richtcharakteristik der Antenne. Die Messanordnung ist in Abbildung 92 dargestellt. Das Testfahrzeug fährt in stetiger Kreisbewegung, während sich das Referenzfahrzeug von diesem langsam entfernt.

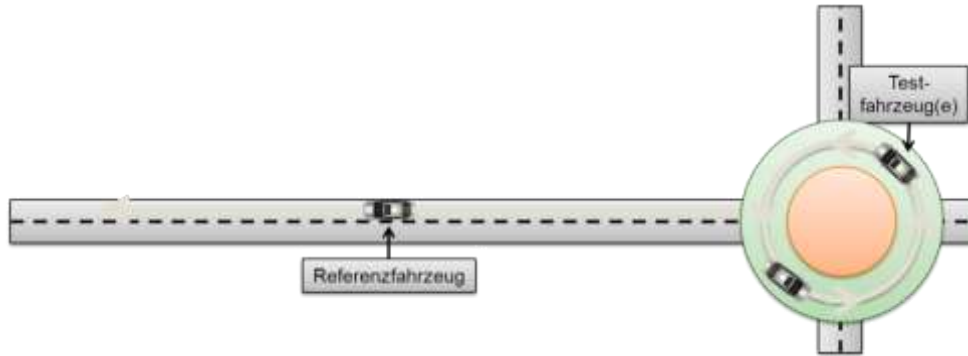


Abbildung 92: Messszenario Reichweitenmessung / Funktionsprüfung

Somit ergibt sich aus Sicht des Testfahrzeuges eine stetig steigende Kommunikationsdistanz aus unterschiedlichsten Winkeln zum Fahrzeugbezugssystem. Als Testnachrichtentyp wurde die „*Vehicle Cooperative Perception Message*“ vCPM verwendet. Ausgewertet wurde die Senderichtung vom Referenzfahrzeug (Sender) zum Testfahrzeug (Empfänger).

In der folgenden beispielhaften Auswertung eines Fahrzeugs steht ein blauer Punkt für eine erfolgreiche Übertragung. Ein roter Punkt visualisiert eine fehlerhafte und somit erfolglose Übertragung. Der Nullgradwinkel im Polarplot entspricht der Fahrtrichtung des Testfahrzeuges. In der Kartendarstellung entsprechen gelbe Punkte den Positionen des Testfahrzeuges. Hier symbolisieren blaue und rote Punkte erfolgreiche bzw. fehlerhafte Übertragungen an der jeweiligen Position des Referenzfahrzeuges.

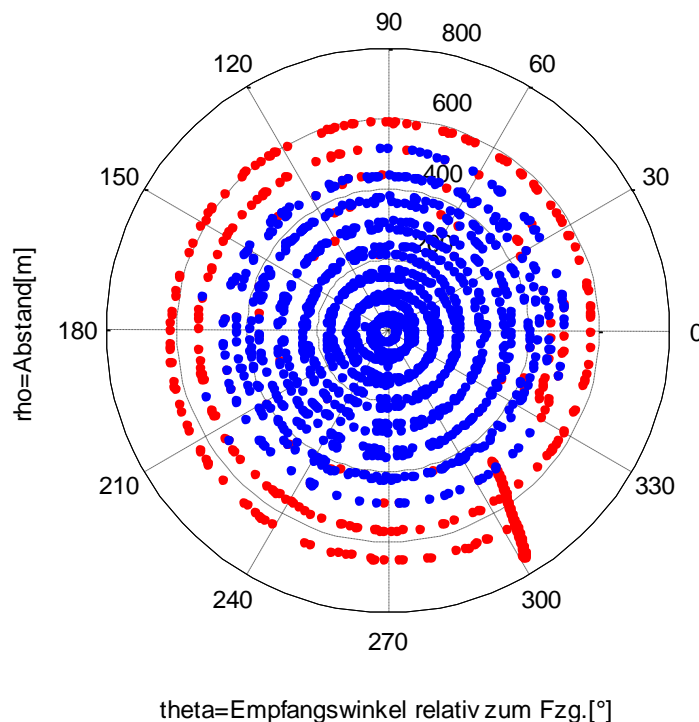


Abbildung 93: Messszenario Reichweitenmessung / Funktionsprüfung

Die Kommunikationsreichweite beträgt mehr als 400 m zum Referenzfahrzeug. Die Reichweite ist durch den Verlust der Sichtverbindung begrenzt. Die Mindestanforderung an die Kommunikationsreichweite von 300 m ist erfüllt. Das Kommunikationscharakteristik ist winkelunabhängig (omnidirektional). Einbrüche aus bestimmten Winkeln sind nicht erkennbar.

Die Zielvorgabe der omnidirektionalen Kommunikationsreichweite von 300 m wurde von allen untersuchten Versuchsträgern erreicht. Unterschiede zwischen den Ergebnissen lassen sich durch die Versuchsdurchführung erklären.

3.4.3.2 Sendeintervall vCPM

Das Sendeverhalten der Versuchsträger wurde für sämtliche Nachrichtentypen durchgeführt. Hier sei anhand der „Cooperative Perception Message“ (vCPM) die Vorgehensweise erläutert. Das Sendeintervall sollte 100 ms bzw. 10 Hz betragen. Das Sendeintervall ergibt sich durch die zeitlichen Abstände von Übertragungen auf der Luftschnittstelle der analysierten vCPM Pakete, wie in Abbildung 94 dargestellt.

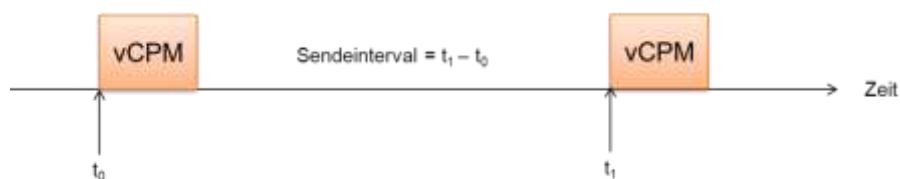


Abbildung 94: Definition Sendeintervall

Zur Auswertung wurden nur sendeseitige Aufzeichnungen verwendet. Das Fahrscenario ist für diese Auswertung des Sendeintervalls irrelevant, da kein Zusammenhang zu möglichen Empfängern existiert. Es wird keine Aussage über die Zeitsynchronisation zwischen Sender und Empfänger getroffen.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf der Sendeintervalle auf der linken Seite. Einzelne Ausreißer sind in dieser Darstellung erkennbar. Das jeweils rechte Diagramm zeigt eine statistische Auswertung der Sendeintervalle in Form eines Histogramms. Gemäß der Anforderung eines konstanten Sendeintervalls von 100 ms sollte die Verteilung idealerweise nur eine Häufung in diesem Zeitintervall zeigen. In realen Systemen sind Abweichungen jedoch unvermeidbar.

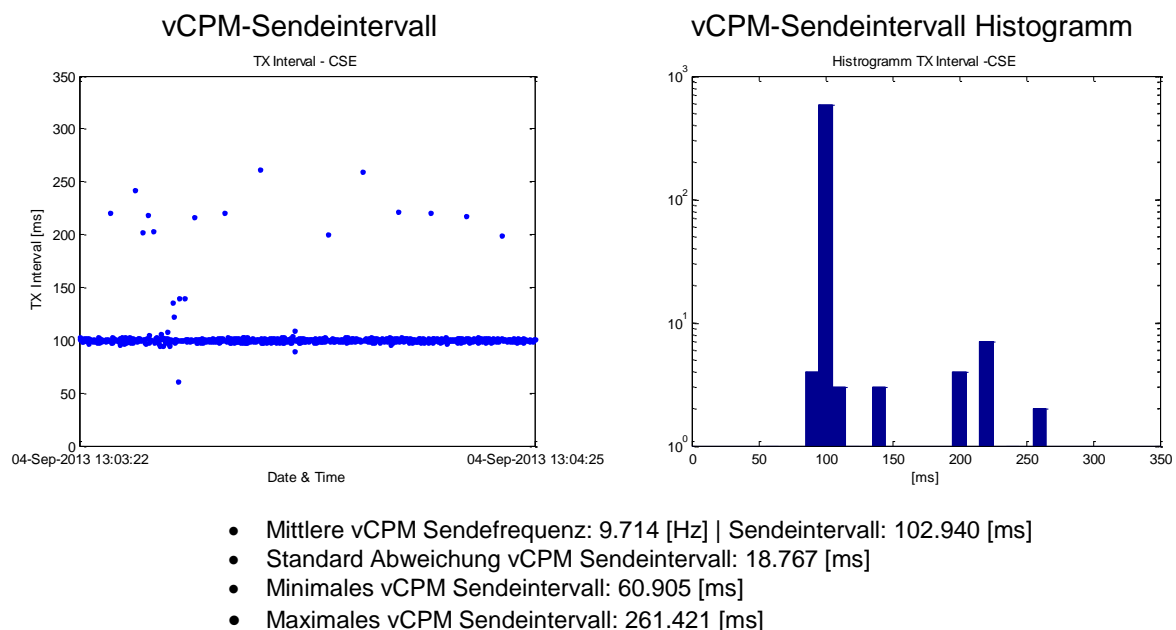


Abbildung 95: vCPM-Sendeintervall

Man beachte die logarithmische Skalierung des Histogramms.

3.4.3.3 Innerstädtische Kommunikationsreichweite

Die innerstädtische Reichweite wurde durch Auswertungen von Vorbeifahrten an der Ko-PER-Versuchskreuzung über verschiedene Kreuzungsarme ermittelt. Die gefahrene Route ist der Karte in

Abbildung 96 dargestellt.



Abbildung 96: Gefahrene Route Versuchsträger Reichweitenmessung

Für eine Auswertung des Kreuzungsarmes „Flachstraße“ standen keine ausreichenden Daten zur Verfügung, so dass dieser Arm nicht ausgewertet werden konnte.

Abbildung 98 zeigt die innerstädtische Paketfehlerwahrscheinlichkeit an der Aschaffenburg Versuchskreuzung. Dargestellt ist der „Downlink“ von der Infrastruktur zum Fahrzeug. Als Sender diente die Ko-PER Kreuzung Aschaffenburg. Als Empfänger ist exemplarisch ein Versuchsträger dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Varianz zwischen den Kreuzungsarmen. In grüner Farbe sind Bereiche mit einer Fehlerrate < 10% dargestellt.

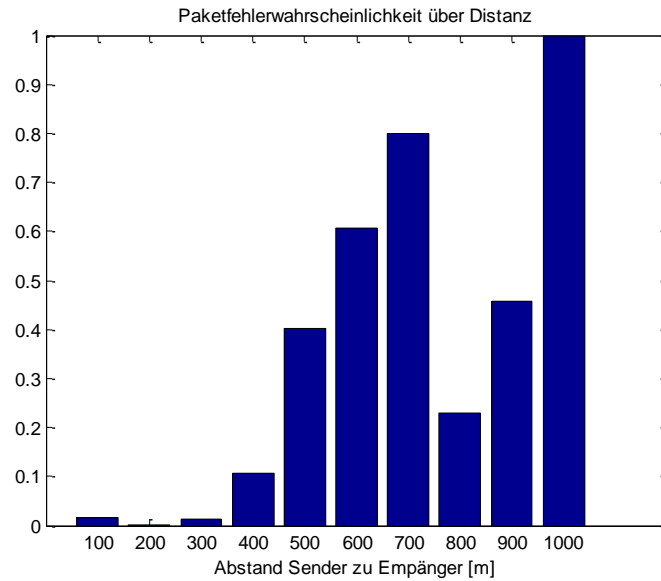


Abbildung 97: Innerstädtische Paketfehlerwahrscheinlichkeit über der Distanz

Abbildung 98 zeigt die Situation in einer Karte. Hierbei zeigt sich eine deutliche Varianz zwischen den Kreuzungsarmen. In grüner Farbe sind Bereiche mit einer Fehlerrate < 10% dargestellt.

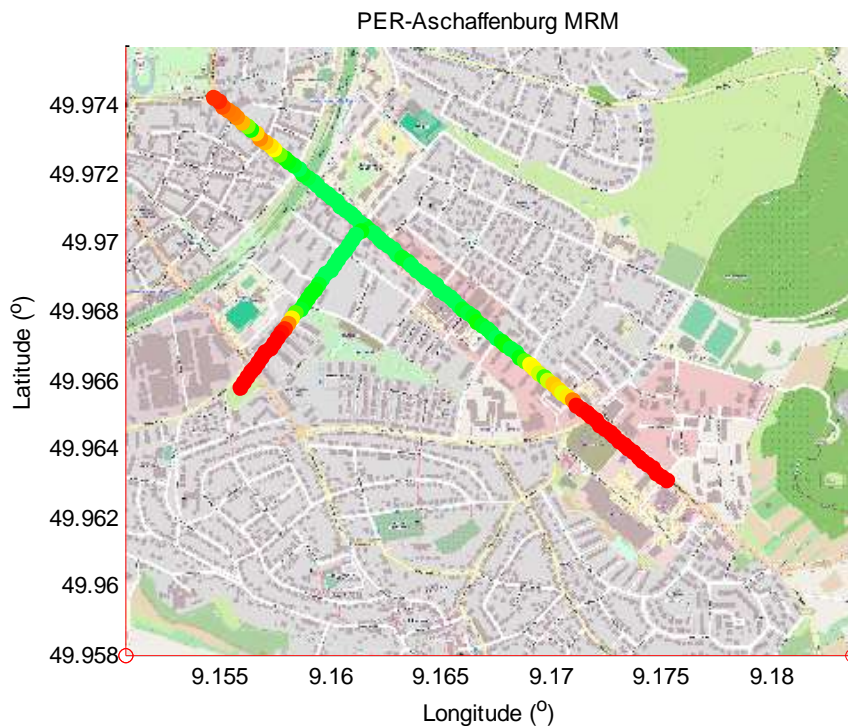


Abbildung 98: Kartendarstellung der Kommunikationsreichweite an der Aschaffenburg Kreuzung

Die Auswertung ergibt eine Paketfehlerrate von unter 10% bei Kommunikationsdistanzen unterhalb 300 m. Die gestellten Anforderungen sind somit erfüllt. Der starke Anstieg der Fehlerquote ab einer Distanz von ca. 400 m ist bedingt durch den Verlust der direkten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger.

Die definierten Zielvorgaben wurden in den analysierten Messreihen von allen Versuchsträgern erreicht. Es sind keine Einschränkungen der Anwendungen durch die Kommunikation zu verzeichnen.

3.5 (Fahrzeug-) Übergreifende Informationsfusion (AP 2.800)

3.5.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In Ko-PER werden Lokalisierungs- und Perzeptionsinformationen von Ko-PER Systemen untereinander kommuniziert. Infolgedessen liegen Informationen über erfasste Verkehrsteilnehmer im Ko-PER-fähigen Empfänger- oder Eigenfahrzeug mehrfach vor¹⁵.

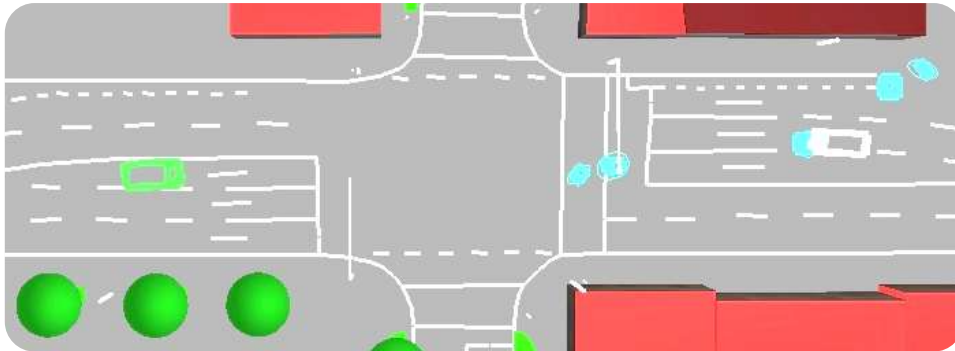


Abbildung 99: Kommunizierte Umfeldinformation

Die fahrzeugübergreifende Informationsfusion assoziiert und fusioniert die Information und stellt der Situationsanalyse eine konsistente Liste der kooperativ erfassten dynamischen Objekte zur Verfügung¹⁶. Hierdurch wird die Möglichkeit geschaffen, auch in Fällen in denen der Konfliktpartner mit der fahrzeuglokalen Sensorik nicht erfassbar ist, eine frühzeitige Warnung bei drohenden Kollisionen zu generieren¹⁷.



Abbildung 100: Fusionierte Umfeldinformation

Im Rahmen von Ko-PER wurden prototypische Systeme zur fahrzeugübergreifenden Informationsfusion realisiert mit denen kooperative Assistenzfunktionen in den Versuchsfahrzeugen dargestellt werden konnten.

3.5.2 Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten hatten vier Schwerpunkte:

- Definition und Erprobung der Schnittstellen (Kommunikation)

¹⁵ Ein Beispiel hierfür ist in der linken Hälfte der Abbildung 99 zu sehen. Für das als hellgraue Box dargestellte Fahrzeug (rechts im Bild) ist sowohl die Lokalisierungsinformation des Fahrzeugs selbst als auch ein Perzeptionsergebnis der Kreuzung (türkis) vorhanden.

¹⁶ Abbildung 100 zeigt die Fusionsergebnisse (MRM) auf Basis der in Abbildung 99 gezeigten Daten. Bei den in Abbildung 100 gezeigten roten Linien handelt es sich um die prädierten Fahrkorridore aus der Situationsanalyse (DAI).

¹⁷ Im Eigenfahrzeug (CP), in Abbildung 100 auf der linken Seite (Warnsymbol), wird eine frühzeitige Warnung generiert, wenn es sich auf Konfliktkurs mit dem Gegenverkehr (H) befindet. Das Fahrzeug (V) fungiert als Sichtverdeckung.

- Entwurf und Implementierung eines echtzeitfähigen prototypischen Systems
- Abgleich der Anwendungsanforderungen mit den informationsliefernden Subsystemen (Lokalisierung und Perzeption)
- Evaluierung der Fusionsergebnisse und Abgleich mit den Anwendungsanforderungen

Partnerübergreifender Schwerpunkt bei der Definition und Erprobung von Schnittstellen lag in der inhaltlichen Ausarbeitung der Nachrichtenformate für die Kommunikation, insbesondere der auf die Entwicklung des kooperativen Perzeptionssystems zugeschnittene CPM-Nachrichtenfamilie.

In der Entwurfs- und Implementierungsphase wurden geeignete Methoden zur zeitlichen Angleichung, Koordinatentransformation, Assoziation und Fusion erarbeitet und implementiert. Begleitend wurden Tests zur Charakterisierung der informationsliefernden Systeme durchgeführt. Mit diesen Tests wurde überprüft, ob

- alle informationsliefernden Systeme die CPM spezifikationskonform aussenden.
- die kommunizierte Information konsistent ist und die
- die kommunizierte Information den anwendungsseitigen Anforderungen genügt.

Nach Abschluss der Implementierungsarbeiten wurden die fahrzeugübergreifende Assoziation im Hinblick auf Echtzeitfähigkeit bei hohem Ausstattungsgrad mit Ko-PER-Technologie und die Fusion im Hinblick auf die Einhaltung der anwendungsseitigen Genauigkeitsanforderungen evaluiert.

3.5.2.1 Systemanforderungen und Spezifikation

Die fahrzeugübergreifende Informationsfusion weist, mit Ausnahme des MMI, Schnittstellen zu allen anderen Ko-PER-Modulen auf, nämlich zur:

- (1) Fahrzeug-Eigenlokalisierung (in)
- (2) Situationsanalyse (in/out)
- (3) Kommunikation (in)
- (4) fahrzeuglokalen Perzeption (in/out)

Der Informationsfluss ist in Abbildung 101 dargestellt. Von den dargestellten Schnittstellen sind alle bis auf die Schnittstellen zur Kommunikation (3a/b) partnerproprietär umsetzbar. Der Fokus der partnerübergreifenden Schnittstellenspezifikation lag daher auf den im TAP 2.720-2 definierten Nachrichten der CPM-Familie. Das entsprechende Dokument wurde in einer zu Projektende aktualisierten Form auf der Ko-FAS Homepage veröffentlicht /19/.

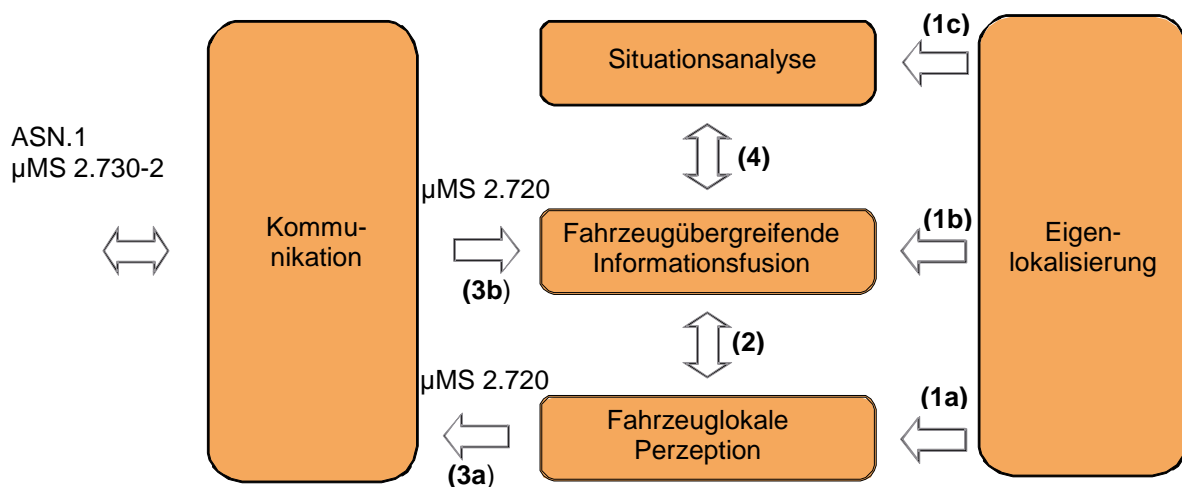


Abbildung 101: Schnittstellen der fahrzeugübergreifenden Informationsfusion

Ergänzend zu den Kommunikationsnachrichten wurden partnerproprietäre Konzepte zur Datenkonfliktbehandlung für die folgenden Konfliktarten erarbeitet:

- Klassifikationskonflikte
- Konflikte im Zustandsraum
- Existenzkonflikte

Zur Behandlung von Klassifikationskonflikten sind in der CPM Inhalte vorgesehen, die eine Konfliktlösung mit Methoden ermöglichen, die auf der Dempster-Shafer-Theorie aufbauen. Zur Behandlung von Existenzkonflikten ist in der CPM ein *FieldOfView*-Modell vorgesehen.

3.5.2.2 Assoziation kommunizierter Fahrumgebungsinformation

Empfangene Informationen müssen vor der Assoziation zeitlich an die aktuelle Fusionszeit angeglichen und in das Fusionskoordinatensystem transformiert werden. Für die zeitliche Angleichung wurde die Prädiktion als Methode gewählt¹⁸. Als Bewegungsmodelle wurden lineare und nichtlineare Modelle, wie CV, CA, CTRV und CTRA implementiert.

Die Transformation in das Fusionskoordinatensystem wurde mit Hilfe der *Unscented Transformation* realisiert, um die Zustandsunsicherheiten konsistent in das Fusionskoordinatensystem zu überführen.

Als Assoziationsmethode wurde der *Auction* Algorithmus implementiert und eingesetzt. Durch ein vorgelagertes Clustering konnte die erforderliche Rechenzeit verringert werden.

Für die Evaluierung der Echtzeitfähigkeit bei hoher Ausstattungsrate wurde der *Auction* Algorithmus anhand simulierter Information mit einer suboptimalen Variante der JPDA-Familie verglichen.

3.5.2.3 Fahrzeugübergreifende Fusion der verfügbaren Umgebungsinformation

Die Implementierung der fahrzeugübergreifenden Fusion wurde schrittweise, zunächst in einer Offline- und nachfolgend in einer Online-Variante realisiert. Die in Abbildung 106 dargestellten Teilfunktionen wurden zunächst in einer Offline-Variante in einer Skriptsprache realisiert und für die Online-Variante auf die Zielplattform portiert.

Zum Test des Fusionssystems und zur Evaluierung wurden mehrere Treffen und Messkampagnen an den Ko-PER-Kreuzungen in Ulm und Aschaffenburg durchgeführt. Hierbei wurden schrittweise sowohl die Funktion der übergreifenden Fusion als auch Optimierungen der fahrzeuglokalen Perzeption zugunsten der übergreifenden Fusion erprobt.

3.5.2.4 Test und Evaluierung der fahrzeugübergreifenden Perzeption

Hinsichtlich der Tests und der Evaluierung der fahrzeugübergreifenden Perzeption gab es zwei Arbeitsschwerpunkte. Es wurde einerseits untersucht, ob die kommunizierten Perzeptions- und Lokalisierungsergebnisse den formulierten Anforderungen genügen; für die realisierten fahrzeugübergreifenden Informationsfusionssysteme wurde andererseits der Nachweis erbracht, dass diese für die Ko-PER-Assistenzfunktionen ausreichend genaue Ergebnisse liefern.

Die durchgeführten Tests der informationsliefernden Systeme sind im Folgenden aufgeführt.

- Die korrekte Umrechnung des Lokalisierungsergebnisses auf den in Ko-PER vereinbarten Bezugspunkt wurde mittels eines RTK-D-GPS-Receivers überprüft.
- Die zeitliche Konformität der Perzeptions- und Lokalisierungsergebnisse und korrekte globale Zeitstempelung (UTC) wurde mit den Daten von RTK-D-GPS-basierten Referenzsystemen überprüft.
- Die geloggtten Kommunikationsnachrichten wurden auf Plausibilität geprüft.

¹⁸ Die alternativen Retrodiktionsmethoden sind mit der für die Fusion eingesetzten *Covariance Intersection* nicht kompatibel. Alternativen zur *Covariance Intersection* lassen sich mit der begrenzten verfügbaren Kommunikationsbandbreite nicht realisieren.

- Die Genauigkeit der Perzeptionssysteme wurde mit Hilfe von RTK-D-GPS-basierten Referenzsystemen evaluiert.

Die Evaluierung der fahrzeugübergreifenden Informationsfusion erfolgte anhand der folgenden Szenarien:

- Linksabbiegen mit Gegenverkehr (Abbildung 102)
- Kreuzen (
- Abbildung 103)
- Längsverkehr 1 (Abbildung 104)
- Längsverkehr 2 (Abbildung 105)

Videomaterial zu den bei der Abschlussdemonstration gezeigten Szenarien Linksabbiegen mit Gegenverkehr und Kreuzen ist auf der Ko-FAS-Homepage verfügbar, /19/.

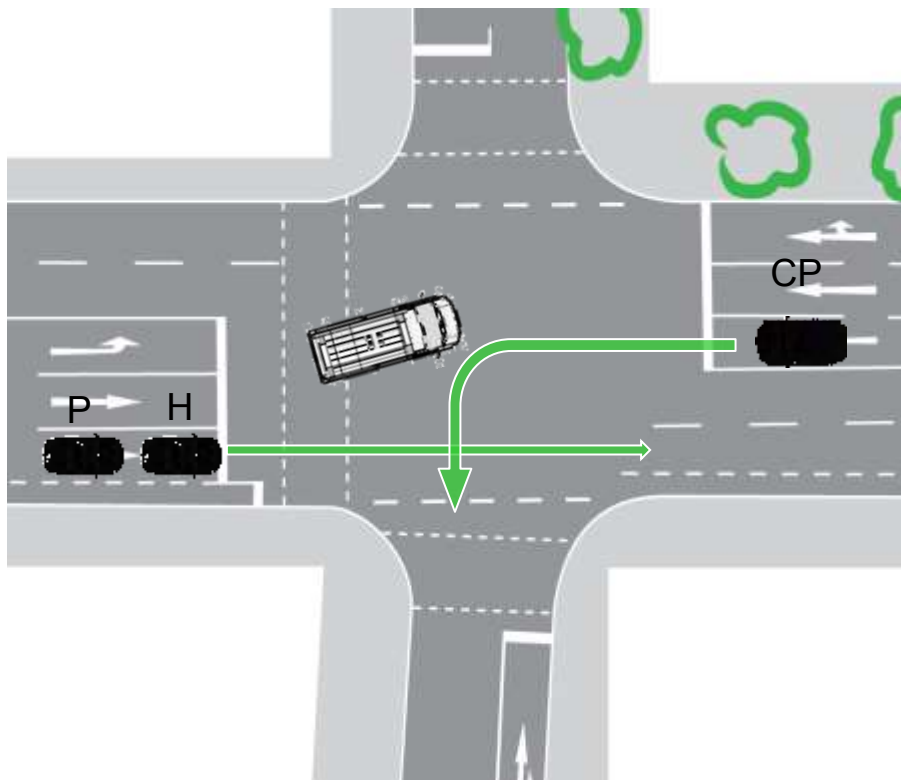


Abbildung 102: Szenario Linksabbiegen mit Gegenverkehr

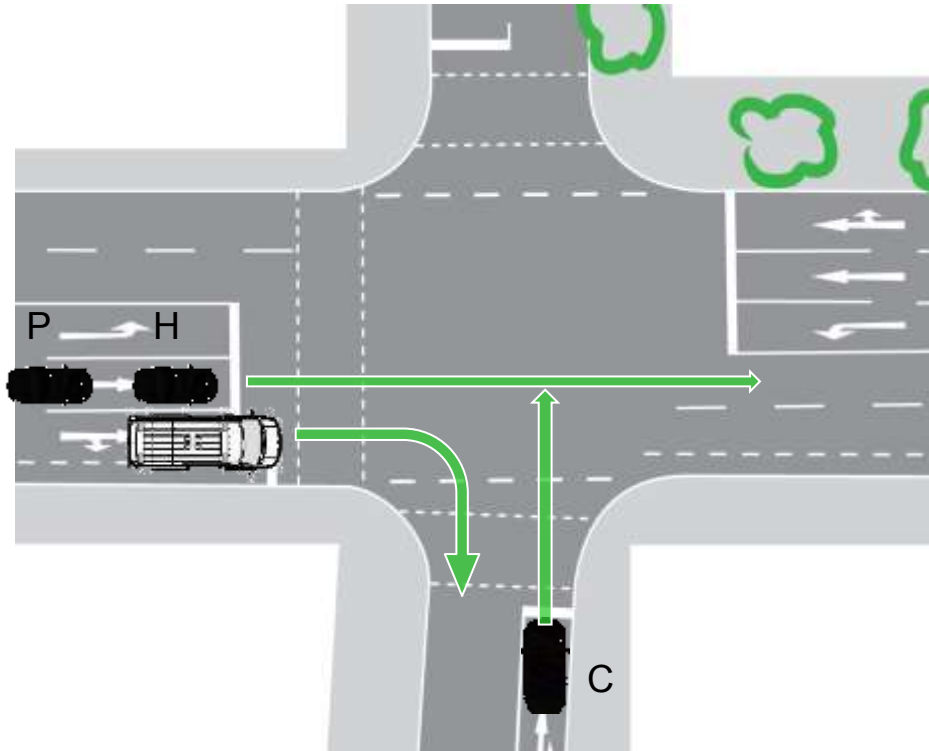


Abbildung 103: Szenario Kreuzen

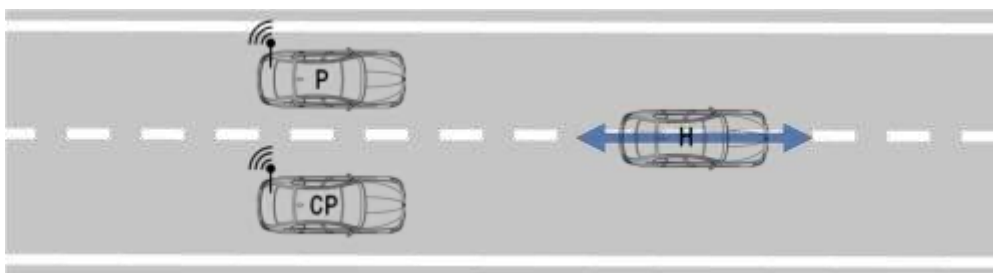


Abbildung 104: Szenario Längsverkehr 1

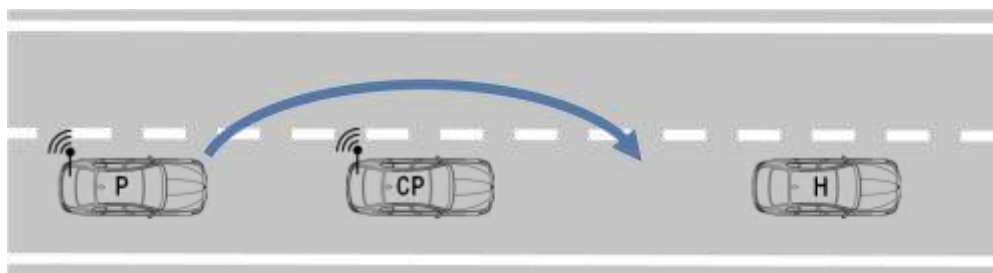


Abbildung 105: Szenario Längsverkehr 2

3.5.3 Ergebnisse

Ergebnisse des Arbeitspaketes fahrzeugübergreifende Informationsfusion sind

- Schnittstellenspezifikation & Systemstruktur,
- Echtzeitfähige prototypische Implementierungen sowie
- Evaluierung der Assoziations- und Fusionsergebnisse.

Die relevanten Aspekte der Schnittstellenspezifikation und die Details der Systemarchitektur sind im Folgenden dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse der Evaluierung werden im Anschluss wiedergegeben. Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

3.5.3.1 Schnittstellen und Systemstruktur

Abbildung 106 gibt exemplarisch einen Überblick über die Schnittstellen und den internen Aufbau eines der prototypisch realisierten Systeme.

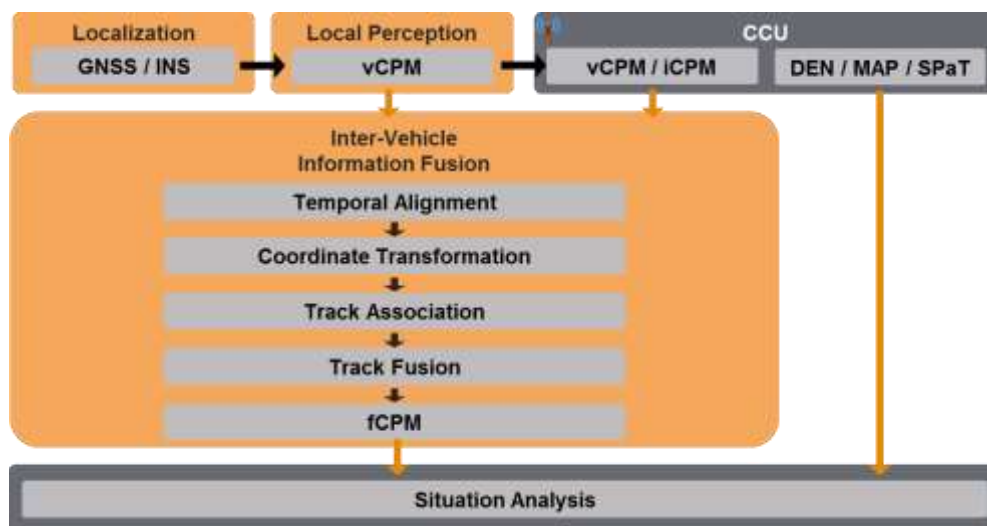


Abbildung 106: Struktur der Fahrzeugübergreifenden Informationsfusion (Beispiel: MRM)

Gemäß der Nummerierung aus Abbildung 101 sind bei dem in Abbildung 106 exemplarisch dargestellten Aufbau des MRM-Systems die Schnittstellen (1a) und (2) in der Struktur der für (3a) generierten CPM zusammengefasst. Die Schnittstellen (1c) und (4) sind ebenfalls mittels der Struktur einer CPM zusammengefasst. Alle in Abbildung 101 dargestellten Schnittstellen lassen sich folglich mit Hilfe der der CPM-Nachrichtenfamilie abbilden.

Im Rahmen des TAP 2.720-2 wurden die für die fahrzeugübergreifende Fusion notwendigen Kommunikationsparameter und Randbedingungen spezifiziert:

- Die Kommunikation der CPM-Nachrichten erfolgt mit 10 Hz.
- Für jede Objektposition muss ein extern beobachtbarer Referenzpunkt angegeben werden, z.B. hintere Fahrzeugmitte.
- Die Lokalisierungs- und Perzeptionsdaten in einer CPM müssen denselben Bezugszeitpunkt haben.
- Ein Informationsfeedback darf nicht erfolgen, d.h., dass die Ergebnisse der fahrzeugübergreifenden Informationsfusion nicht in einer CPM an andere Ko-PER-Systeme zurückgesendet werden dürfen, um inkonsistente Fusionsergebnisse zu vermeiden, /20/.

Die Einhaltung dieser Randbedingungen ist bei den in Ko-PER genutzten Algorithmen notwendig, um sowohl die erforderlichen Genauigkeiten der Objektpositionen zur Spurzuordnung und deren Konsistenz als auch eine ausreichend niedrige Latenz für eine frühzeitige Warnung erreichen zu können.

Die Verarbeitung empfangener und lokaler Umfeld-Information in Form einer CPM erfolgt nach dem in Abbildung 106 gezeigten Schema. Vor der eigentlichen Fusion wird die eingehende Information anhand der ihr aufgeprägten Zeitstempel temporal angeglichen, ins Fusionskoordinatensystem transformiert und assoziiert.

Die fahrzeugübergreifende Fusion basiert auf einer Sensor-2-Global-Architektur, siehe Abbildung 107. Da die verschiedenen Ko-PER-Systeme unterschiedliche Objekte wahrnehmen,

hält das fahrzeugübergreifende Fusionssystem eine Liste sog. globaler Tracks. Diese Liste enthält alle kooperativ erfassten Objekte.

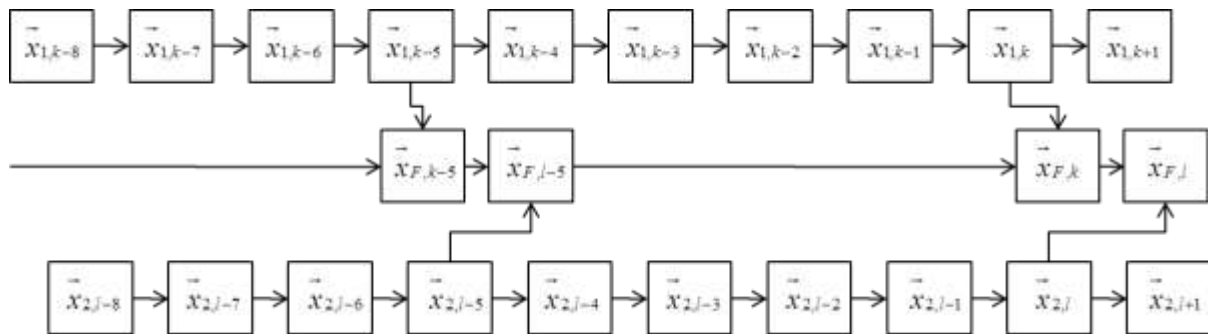


Abbildung 107: Sensor-2-Global-Fusionsarchitektur

Wird neue Information empfangen, so bezieht sich diese entweder auf einen früheren, späteren oder den gleichen globalen Gültigkeitszeitpunkt wie die globale *Track*-Liste. Für die Fusion müssen sich beide Datensätze auf denselben globalen Zeitpunkt beziehen.

Im realisierten System wird die ältere Information mit Bewegungsmodellen, wie CV, CA, CTRV oder CTRA auf den Gültigkeitszeitpunkt der jüngeren Information prädictiert. Dies bewirkt phänomenologisch eine Vergrößerung der Zustandsunsicherheit des prädictierten Tracks, siehe Abbildung 108.



Abbildung 108: Beispiel: Vergrößerung der Positionsunsicherheit durch die Prädiktion

Die Vergrößerung der Zustandsunsicherheit ist gleichbedeutend mit einem Informationsverlust, der umso größer ist, je größer die Zeitdifferenz zwischen der anzulegenden Information ist. Eine aus der fahrzeuglokalen Perzeption bekannte Methode diesen Informationsverlust zu minimieren, ist die Retrodiktion. Im Kontext der fahrzeugübergreifenden Fusion ist diese Methodik jedoch nicht anwendbar, da sie mit der verwendeten Fusionsmethode, der *Covariance Intersection*, nicht kompatibel ist.

Bei der Auswahl der *Track-2-Track* Fusionsmethode wurden neben der *Covariance Intersection* sowohl die *Cross Covariance* Methode als auch der *Information Matrix* Ansatz betrachtet. Die *Cross Covariance* Methode ist auf Grund der Beschränkung auf *Steady-State* Kalman-Filter mit identischen Bewegungsmodellen als Fusionsmethode in den lokalen Perzeptionssystemen nicht für die kooperative Perzeption geeignet. Die *Information Matrix* Methode liefert zwar bessere Fusionsergebnisse als die *Covariance Intersection*, hat aber einen doppelt so hohen Kommunikationsbedarf, da der Zustand zusätzlich in prädictierter Form benötigt wird. Mit dem in Ko-PER eingesetzten Kommunikationsstandard ist ein Feldeinsatz des *Information Matrix* Ansatzes seitens der verfügbaren Bandbreite nicht realistisch.

Nach der zeitlichen Angleichung erfolgt die Transformation der neu eingegangenen Information in das Fusionskoordinatensystem, siehe Abbildung 109. Hierfür wird im ersten Schritt die Relativposition und -orientierung des Senders gegenüber dem Eigenfahrzeug berechnet. Im zweiten Schritt werden die Objektzustände mit der Relativposition und -orientierung in das Fusionskoordinatensystem transformiert. Durch den Einsatz der *Unscented Transformation* werden die Zustandsunsicherheiten in den beiden Transformationsschritten ebenfalls in das Fusionskoordinatensystem transformiert.

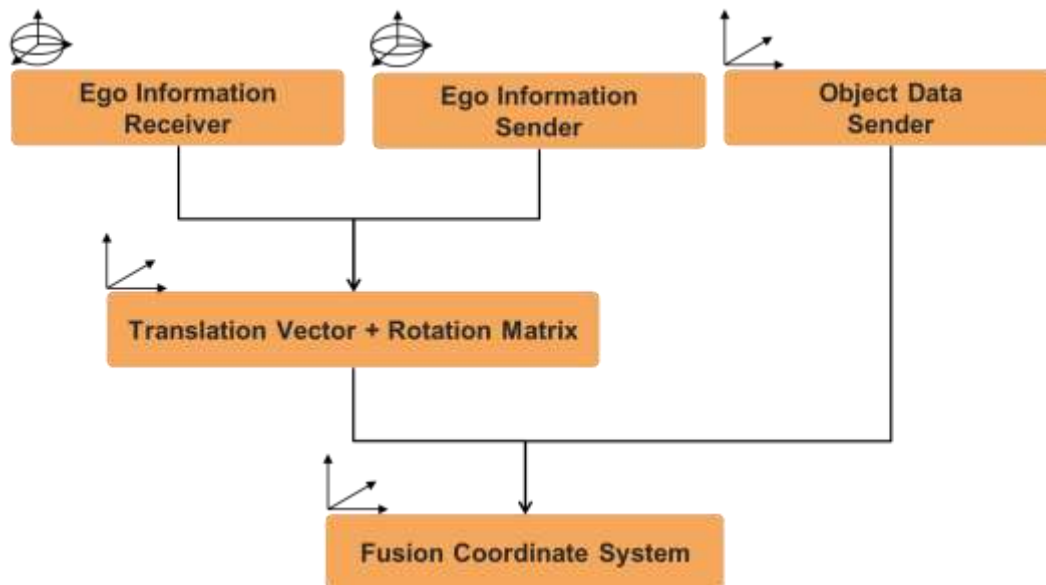


Abbildung 109: Transformation empfangener Umfeld-Information in das Fusionskoordinatensystem

Die Genauigkeit der im ersten Transformationsschritt genutzten globalen Orientierung des Senders hat maßgeblichen Einfluss auf die Assoziierbarkeit der Information. Der maximal zulässige Orientierungsfehler ist abhängig vom Abstand des Objektes zum Sender. Je weiter das Objekt vom Sender entfernt ist, umso genauer muss dessen globale Orientierung bekannt sein. Die Anforderung ist im Grundsatz identisch mit der Anwendung ein Fahrzeug zuverlässig einer Fahrspur zu zuordnen, d.h. die durch den Orientierungsfehler entstehende laterale Positionsabweichung darf nicht größer sein als eine halbe Fahrzeugbreite. Dies führt, je nach Anwendung, zu Anforderungen an die globale Orientierungsgenauigkeit in der Größenordnung von einem Grad und darunter. Werden die Anforderungen nicht erfüllt, kann keine zuverlässige Assoziation garantiert werden. Information von Fahrzeugen, die die Lokalisierungsanforderungen nicht erfüllen, wird daher verworfen. Als Kriterium werden die als konsistent vorausgesetzten Standardabweichungen von Position und Orientierung herangezogen.

Nach der Transformation erfolgt die eigentliche Assoziation. Die Assoziation lässt sich in drei Schritte unterteilen:

- Wahrscheinlichkeitsberechnung / *Gating* (inkl. Referenzpunkt-Transformation)
- Gruppierung / *Clustering*
- Assoziation (*Auction*-Algorithmus)

Die Teilschritte sind in Abbildung 110 graphisch veranschaulicht. Im ersten Schritt, der *Likelihood*-Berechnung, werden die Zuordnungskosten für jede Objektzuordnungskombination aus den beiden zu assoziierenden Datensätzen berechnet. Hierbei erfolgt ein *Gating*, d.h. dass bereits aufgrund der Zuordnungskosten unrealistische Assoziationen von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen werden.

Im zweiten optionalen Schritt, dem *Clustering*, werden Gruppen von Objekten (Cluster) aus beiden Datensätzen gesucht, für die sich nach dem *Gating* noch keine eindeutige Zuordnung ergeben hat. Das Clustering ermöglicht es, Rechenzeit zu sparen indem der Assoziationsalgorithmus auf jedes Cluster mit mehr als zwei Objekten statt auf alle Objekte angewandt wird.

Im dritten Schritt wird der Assoziationsalgorithmus auf die Objektcluster angewandt. Ergebnis ist eine eins-zu-eins Zuordnung der Objekte beider Datensätze zuzüglich der nicht zuordenbaren Objekte aus beiden Datensätzen.

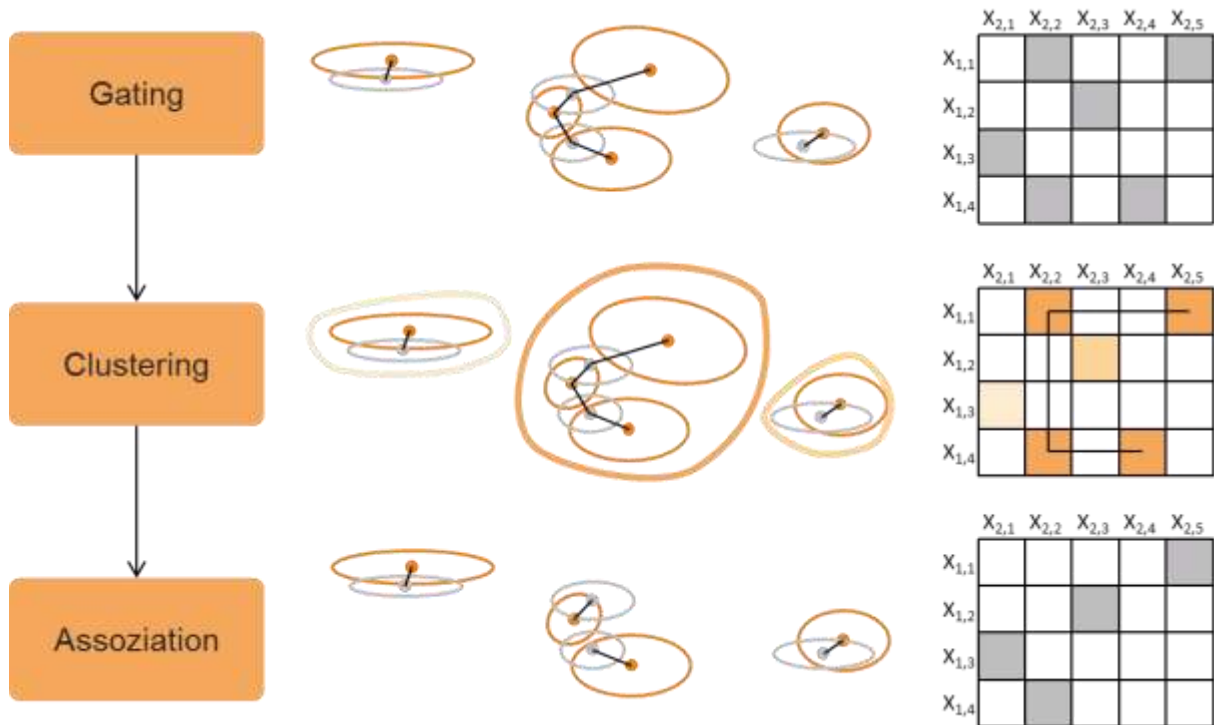


Abbildung 110: Struktur der Assoziation

Als Assoziationsalgorithmus wurde von allen Partnern der Auction-Algorithmus eingesetzt. Der Algorithmus wurde aus den folgenden Gründen ausgewählt:

- Er gehört zu den schnellsten aus der Literatur bekannten global optimalen Assoziationsalgorithmen. Da im Feldeinsatz sehr viele Objekte assoziiert werden müssen, ist die Laufzeit ein wesentliches Entscheidungskriterium.
- Es wird davon ausgegangen, dass die von den Ko-PER Systemen kommunizierten Daten keine Mehrfachdetektionen enthalten und Falschalarme auf der Senderseite effektiv unterdrückt werden. Die dem Algorithmus zugrunde liegende Annahme, dass für jedes Objekt jeweils nur ein anderes Objekt vorhanden ist, wird damit als erfüllt angesehen.

3.5.3.2 Evaluierung

Durch Simulation eines extremalen Assoziationsproblems, siehe Abbildung 111, wurde die Echtzeitfähigkeit des genutzten *Auction*-Algorithmus überprüft und ein Vergleich mit der suboptimalen Variante des JPDA durchgeführt. Die auf der Zielplattform erreichten Laufzeiten des *Auction*-Algorithmus lagen deutlich unterhalb der Echtzeitgrenze. Durch den Einsatz des Clustering konnte eine Laufzeitverkürzung erzielt werden. Die JPDA-Variante konnte die Echtzeitbedingungen nur unter Einsatz des *Clusterings* einhalten.

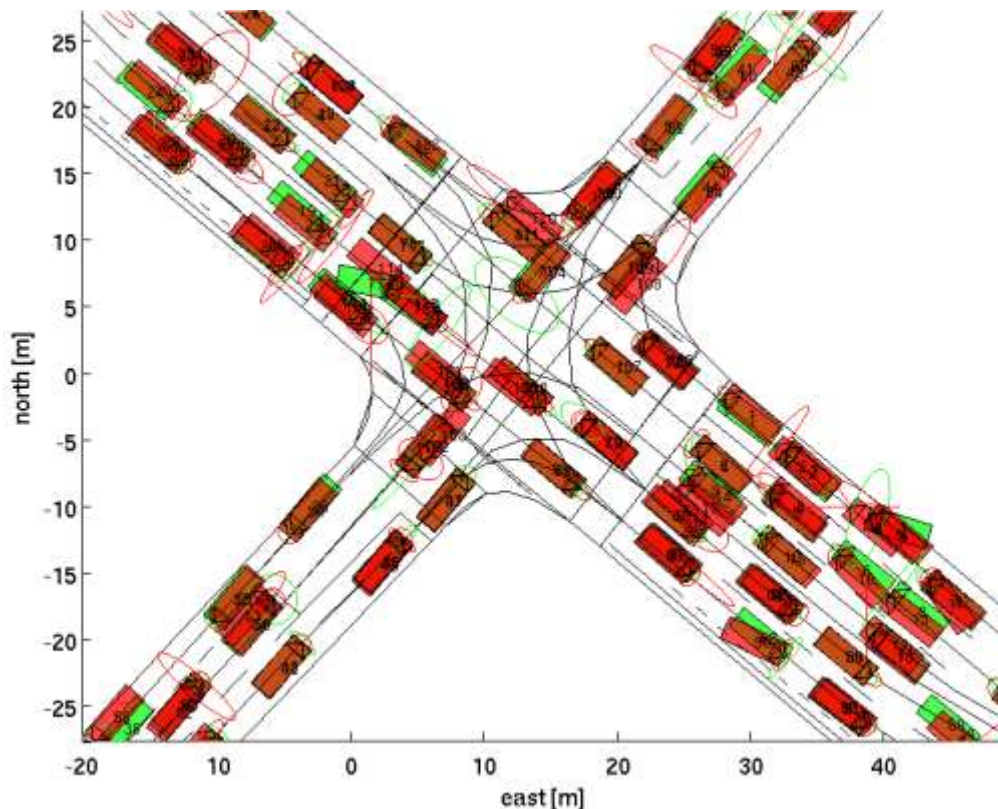


Abbildung 111: Simulation des Assoziationsproblems an einer dicht befahrenen Kreuzung

Die Güte der Fusionsergebnisse der fahrzeugübergreifenden Informationsfusion wurde anhand der Standardabweichung (*Root Mean Square Error* – RMSE) der anwendungsrelevanten Zustandsgrößen, Position, Geschwindigkeit und Orientierung des sog. Hasenfahrzeugs im Koordinatensystem des Eigenfahrzeugs evaluiert. Die notwendige *Ground Truth* wurde mit Hilfe RTK-D-GPS-basierter Referenzsysteme im Referenz- („Hasen“-) und Eigenfahrzeug generiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Szenario	x	y	v_x	v_y	yaw
Linksabbiegen mit Gegenverkehr	0,59 m	0,34 m	0,17 m/s	0,47 m/s	3,60 °
Kreuzen	0,30 m	0,17 m	0,52 m/s	0,51 m/s	3,14 °
Längsverkehr 1	0,56 m	0,49 m	1,11 m/s	0,25 m/s	0,35°
Längsverkehr 2	0,35 m	0,80 m	0,21 m/s	0,48 m/s	0,94°

Tabelle 15: Fahrzeug übergreifende Informationsfusion - *Root Mean Square Error* (RMSE)

Die Positionsfehler der evaluierten Systeme lagen unterhalb einem Meter. Dies ermöglicht eine zuverlässige Spurassoziation in der Situationsanalyse.

Voraussetzung für die erreichte Genauigkeit ist die Verfügbarkeit einer ausreichend genauen Lokalisierung. In den Ko-PER Fahrzeugen jener Partner, die in Ko-PER nicht mit der Entwicklung eines Lokalisierungsverfahrens beauftragt waren, wurden daher die Daten der Referenzsysteme genutzt um die anwendungsseitig geforderten Genauigkeiten zu erreichen.

3.5.3.3 Zusammenfassung zu Abschnitt 3.5

Für die prototypische Implementierung wurden Schnittstellen der fahrzeugübergreifenden Informationsfusion zur fahrzeuglokalen Perzeption, Lokalisierung, Kommunikation und Situationsanalyse spezifiziert und implementiert. Die Schnittstellen zu allen Modulen lassen sich mit der für die Kommunikation definierten CPM-Familie (*Cooperative Perception Message*) abbilden.

Echtzeitfähige Systeme zur fahrzeugübergreifenden Informationsfusion wurden implementiert und getestet. Als Fusionsmethode wurde die *Covariance Intersection* eingesetzt. Die realisierten Systeme sind in der Lage, empfangene Information der Ko-PER Systeme zu fusionieren und in geeigneter Qualität an die Situationsanalyse weiterzureichen.

Im Rahmen der Entwicklung wurden Algorithmen zur Datenassoziation untersucht und der *Auction* Algorithmus für die echtzeitfähige Implementierung ausgewählt. Voraussetzung für die Assoziierbarkeit empfangener Information ist deren Konsistenz und die Genauigkeit der Lokalisierung von Sender und Empfänger. Letztere muss im Bereich der Anwendungsanforderungen der Ko-PER-Anwendungen an die Lokalisierung¹⁹ liegen. Eine präzise Zeitstempelung der Messdaten auf die globale Zeitbasis UTC ist zur Gewährleistung der Konsistenz erforderlich. Die Anwendungsanforderungen an die Lokalisierung werden von Standard-GPS-Empfängern im Allgemeinen nicht mit ausreichender Verfügbarkeit erfüllt. Der Einsatz einer der in Ko-PER untersuchten Ansätze zur Lokalisierung ist daher für eine ausreichende Funktionsverfügbarkeit notwendig.

Mit dem verwendeten *Auction* Algorithmus ist auch bei hohem Informationsaufkommen eine Assoziation in Echtzeit möglich. Durch den optionalen Einsatz von Clustering-Algorithmen kann die Rechenzeit bei Bedarf verringert werden.

Die Fusionsergebnisse der prototypisch realisierten Systeme zweier Partner wurden anhand des *Root Mean Square Errors* mit Hilfe von RTK-D-GPS-basierten Referenzsystemen in je zwei Szenarien im Kreuzungsbereich und im Längsverkehr evaluiert. Die Ergebnisse waren konform mit den Anwendungsanforderungen. Die Ergebnisse der Implementierungen der beiden Partner waren vergleichbar.

3.6 Situationsanalyse, Risikoabschätzung (Teil von AP 2.a00)

3.6.1 Motivation und Kontext

Nach derzeitigem Stand der Technik bezieht sich die Situationsanalyse und Risikoabschätzung auf bestimmte, vorab ausgewählte Szenarien und Verkehrsabläufe. Zur Diskussion der diesbezüglichen Arbeiten, ist daher die Spezifikation der betrachteten Szenarien Voraussetzung. Diese werden in Abschnitt 3.8 wieder aufgegriffen.

Eines der Hauptziele der Situationsanalyse besteht in der Bewertung der Kritikalität aktuell vorliegender Verkehrssituationen anhand von Kritikalitätsmaßen. Solche Maße dienen den Assistenzfunktionen als Entscheidungsgrundlagen zur Einleitung von Aktionen (z.B. Warnung, Notbremsung, Ausweichen etc.).

Demnach liefert die Situationsanalyse mit Kritikalitätsmaßen einen Gestaltungsspielraum für die Funktionsauslegung. Dabei kann gleichzeitig ein Entscheidungsspielraum für die Assistenzfunktion unter Berücksichtigung von produkthaftungs- und rechtlichen Aspekten eingeräumt werden.

Die Situationsanalyse ist das entscheidende Bindeglied zwischen der Sensorik / Umfelderkennung und den Assistenzfunktionen und ist daher die grundlegende Basis für die Entwicklung zukünftiger aktiver Sicherheitssystemen zur Unfallvermeidung bzw. zur Minderung der Unfallfolgen.

Im Folgenden wird zunächst die Aufgabenstellung der Situationsanalyse im Kontext des Projekts näher beleuchtet. Anschließend wird auf die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse eingegangen.

¹⁹ Im Kreuzungsbereich: Positionsfehler (global) < 1m, Orientierungsfehler (global) < 1°

3.6.2 Aufgabenstellung und Zielsetzungen

Für die Ausarbeitung von Konzepten und die Darstellung in Demonstrationsszenarien ist zunächst festzulegen, welche Szenarien relevant sind. Bei der Ausarbeitung ist danach von der Situationsanalyse folgende Aufgabenfolge zu berücksichtigen:

(1) Bereitstellung von Eingangsdaten und Berücksichtigung von Unsicherheiten (verfügbare Informationen) aus

- fahrzeuglokaler Perzeption und Fusion,
- fahrzeugübergreifender Fusion,
- Fahrzeug-Eigenlokalisierung,
- Kommunikation sowie
- Kontextinformation, z.B. über Ampelphasen, Verkehrsregelung, Topographie und Topologie.

(2) Klassifikation der Situation (z.B. Einscher-Vorgang, Linksabbiegen mit potentieller Gefährdung oder unkritisches amerikanisches Linksabbiegen, drohende Kollision mit einem Fußgänger, etc.)

(3) Konzept zur Situationsanalyse mit der Vorhersage, wie sich die Situation mit welcher Wahrscheinlichkeit entwickeln wird

(4) Funktionsunabhängige Situationsbewertung (z.B. die Kritikalität der betrachteten Situation), die allen Funktionen zur Verfügung steht

(5) Funktionsspezifische Bewertung Konzept zur Priorisierung der Handlungsoptionen: Information, Warnung, Eingriff

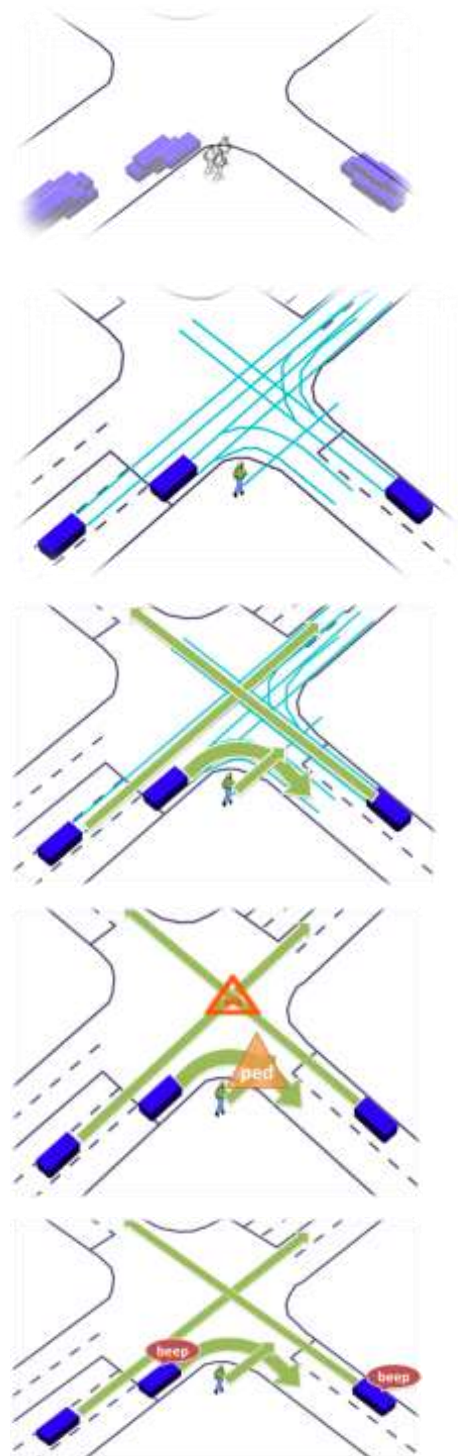


Abbildung 112 Aufgabenstellung und Zielsetzungen

3.6.3 Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

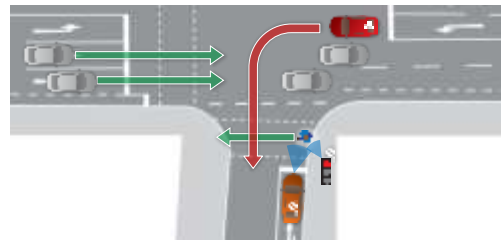
Die zur Situationsanalyse durchgeführten Arbeiten sind zu einem großen Teil funktionspezifisch. Ausgehend von der darzustellenden Funktion ist die Aufbereitung der Eingangsdaten,

ein Konzept zur Prädiktion der Situation sowie ein funktionsspezifisches Warnkonzept auszuarbeiten. In diesem Kapitel wird daher zunächst die Wahl der Demonstrationsszenarien dargestellt, bevor die durchgeführten Arbeiten zur Situationsanalyse für die spezifischen Szenarien ausführlicher beschrieben werden.

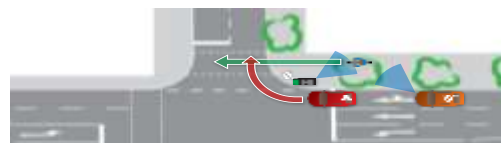
3.6.3.1 Auswahl der Demonstrationsszenarien

Die ausgewählten Szenarien für die Abschlusspräsentation lassen sich in die drei Gruppen „kooperativer Radfahrer- und Fußgängerschutz“, „kooperative Kreuzungsassistenz“ und „kooperativer Schutz bei querenden Fußgängern“ unterteilen und werden im Folgenden im Einzelnen beschrieben.

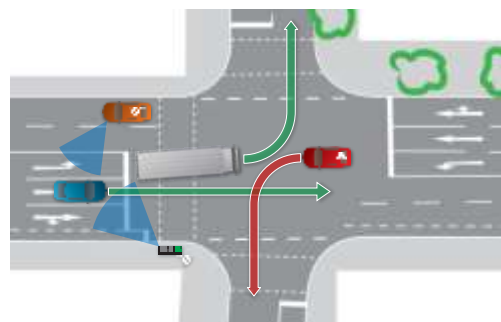
Kooperativer Fußgängerschutz: Mit der Absicht an einer Kreuzung in den linken Seitenarm abzubiegen, konzentriert sich der Fahrer im roten Systemfahrzeug auf das Finden einer Lücke im Gegenverkehr und nimmt daher einen den Seitenarm querenden Fußgänger zunächst nicht wahr. Der überschreitende Fußgänger wird von anderen Fahrzeugen oder per Kreuzungsperzeption detektiert und seine Anwesenheit wird an das rote Fahrzeug übermittelt.



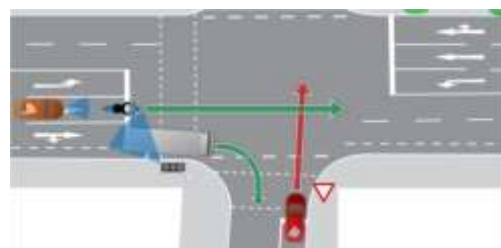
Kooperativer Radfahrerschutz: Das zweite Szenario beschreibt einen Konflikt zwischen einem rechtsabbiegenden PKW (rot) und einem auf dem Radweg querenden Radfahrer. Der Fahrer des abbiegenden PKW soll durch die Information über den Radfahrer unterstützt werden. Diese wird per Infrastruktur oder durch ein weiteres Fahrzeug (orange) übermittelt.



Das Szenario **Linksabbiegen bei Gegenverkehr** greift sowohl innerorts als auch auf Landstraßen häufige Unfallsituation des Anwendungsfalls „Gegenverkehr“ auf. Mittels kooperativer Perzeption sollen insbesondere Verdeckungssituationen – hier durch den linksabbiegenden LKW visualisiert – entschärft werden. Informationen über das vorfahrtsberechtigten, geradeausfahrenden Fahrzeug (blau) erhält das linksabbiegende Fahrzeug (rot) durch die Infrastruktur oder durch ein mit fahrzeuglokaler Sensorik und Kommunikation ausgestattetes Fahrzeug (orange).



Das Szenario **„Kreuzende Fahrzeuge mit vorfahrtsberechtigtem Fahrzeug von links“** beschreibt eine im Innerortsbereich häufig vertretene Konfliktsituation des Anwendungsfalls „Querverkehr“: Der Fahrer (rot) soll hierbei darin unterstützt werden, einen Konflikt mit einem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug von links (blau) – hier exemplarisch das Motorrad – zu vermeiden. Sichtverdeckend könnte in dieser Situation beispielsweise ein vor dem Motorradfahrer fahrender Rechtsabbieger wirken.



Querender Fußgänger: Das letzte Szenario greift Konfliktsituationen auf, in denen ein Fußgänger für einen Fahrer nicht vorhersehbar bzw. sehr spät wahrnehmbar die Fahrbahn überschreitet. Bei der dargestellten Situation wird der Fußgänger durch das Fahrzeug (orange) mittels Ko-TAG Sensorik erfasst. Die Informationen dienen im Systemfahrzeug (rot) als Eingangsgrößen für die Assistenz.

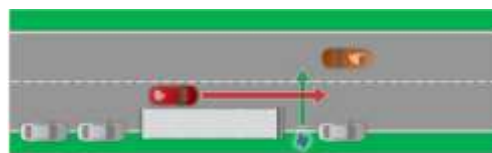


Abbildung 113: Auswahl der Szenarien

3.6.3.2 Methoden der Situationsanalyse für Kooperativen Radfahrer- und Fußgängerschutz

Während Kollisionen zwischen Fahrzeugen oft nur zu Sachschäden führen, entfallen mehr als die Hälfte der innerorts bei Verkehrsunfällen Getöteten auf Fußgänger- und Radfahrerunfälle /21/. Ein wesentliches Ziel der in Ko-PER entwickelten Technologien zur kooperativen Perzeption ist es daher, die Detektion solcher verletzlichen Verkehrsteilnehmer zu verbessern, so dass Fahrerassistenzsysteme durch eine geeignete Intervention, bspw. einen Hinweis auf den bevorstehenden Konflikt im Head-Up Display des Fahrzeugs, die Zahl der durch Verkehrsunfälle getöteten Fußgänger und Radfahrer weiter reduzieren können.

Durch den mittels der Ko-PER Technologien realisierten Austausch von Wahrnehmungsergebnissen wird die fahrzeuglokale Umfelderkennung durch Informationen, die anderen Verkehrsteilnehmern vorliegen, unterstützt. Neben der Erweiterung der Sensorreichweite und der Verbesserung der Zuverlässigkeit der Daten, besteht ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie darin, dass verletzliche Verkehrsteilnehmer, die selber keine Information über ihre Position senden, auch dann geschützt werden können, wenn sie von dem sie gefährdenden Fahrzeug sensorisch nicht direkt erfasst werden können – beispielsweise aufgrund von Verdeckungen.

Typische Verdeckungen sind gegeben, wenn ein Fußgänger hinter einem parkenden Fahrzeug auf die Straße tritt (Szenario „Kooperativer Fußgängerschutz“) oder ein Radfahrer an einer Gebäudeecke dem Blick des ihn gefährdenden Fahrzeuglenkers entzogen ist (Szenario „Kreuzen mit Radfahrer“). Ein weiterer typischer Radfahrerunfall kommt zustande, wenn sich der Fahrradfahrer aus einer Richtung annähert, in der er sowohl für den Fahrer wie auch für die fahrzeuglokale Sensorik nur schwer auszumachen ist – beispielsweise beim Linksabbiegen (Szenario „Linksabbiegen mit Radfahrer“).

Im Rahmen der Ko-PER Abschlusspräsentation wurde das Ko-PER Assistenzsystem für alle drei Szenarien als Live Demo vorgestellt. Entscheidend für die Situationsanalyse war hierfür vor allem die Fähigkeit, die weitere Bewegung des Fahrzeugs exakt zu prädictieren, um so die Notwendigkeit und den Zeitpunkt einer Warnung vor dem Radfahrer zu bestimmen. Dies ist beispielsweise beim Linksabbiegen nicht trivial, da der Fahrer beim Losfahren aus dem Stand typischerweise beschleunigt und eine Warnung basierend auf der Annahme konstanter Geschwindigkeiten somit zu spät ausgegeben würde. Stattdessen wurde hierfür der im Rahmen des Projekts entwickelte, modellbasierte Ansatz aus /22/ bzw. /24/ verwendet.

Voraussetzung für die Vorhersage der weiteren Bewegung des Fahrzeugs ist in vielen Fällen die Kenntnis der Fahrerabsicht – beispielsweise wird sich der Fahrer im Szenario „Kreuzen mit Radfahrer“ bei grüner Ampel anders an die Kreuzung annähern, wenn er rechts abbiegen will, als wenn er beabsichtigt geradeaus zu fahren. Der daraus resultierende Zeitunterschied bis zum Erreichen des Konfliktpunkts kann somit die Entscheidung über die Notwendigkeit einer Warnung beeinflussen.

Dieser Einfluss ist in anderen Situationen, beispielsweise beim Rechtsabbiegen mit sich parallel auf dem Radweg befindlichem Radfahrer, noch deutlich stärker ausgeprägt. Aufgrund der ständig zunehmenden Funktionsdichte erscheint es jedoch weder sinnvoll noch möglich, auch zukünftig für jede beliebige Situation spezielle Algorithmen zur Situationsinterpretation bereit zu stellen. Stattdessen wurde in Ko-PER ein generischer Ansatz zur Fahrerabsichtserkennung auf Basis parametrischer Modelle entwickelt /25/. Dieser sieht vor, dass, zunächst

ausgehend von der aktuellen Position des Fahrzeugs, alle möglichen zukünftigen Pfade des Fahrzeugs innerhalb eines vorgegebenen Vorausschauhorizonts bestimmt werden. Im Anschluss werden diesen sogenannten Hypothesen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, indem das für die jeweilige Hypothese zu erwartende Fahrerverhalten (Blinker-Aktivierung, Geschwindigkeitsverlauf, Blickrichtung) mit dem tatsächlich beobachteten Verhalten verglichen wird. Grundlage hierfür sind parametrische Modelle, die das Fahrerverhalten im Hinblick auf jedes der genannten Merkmale allgemeingültig für beliebige Verkehrssituationen und potenzielle Manöver beschreiben.

Eine weitere Problematik besteht darin, dass eine Verbesserung der Umfelderkennung durch bessere Sensorik und/oder kooperative Perzeption nicht dazu führen darf, dass dem Fahrer zukünftig deutlich mehr Warnungen präsentiert werden – andernfalls besteht die Gefahr, dass sich der Fahrer durch die Vielzahl der Hinweise genervt fühlt und das System einfach abschaltet. Ein erster, wesentlicher Schritt besteht in der bereits beschriebenen Berücksichtigung der Relevanz potenzieller Konflikte, also der Wahrscheinlichkeit, dass diese überhaupt auf dem vom Fahrer vorgesehenen Pfad liegen. Dennoch besteht auch dann die Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer den relevanten Verkehrsteilnehmer bereits gesehen hat und die Warnung somit unnötig ist.

Vor dem Hintergrund kommunikationsbasierter Umfeld-Wahrnehmung steht die Vermeidung unnötiger Warnungen insofern besonders im Fokus, als sich der Fahrer nach Möglichkeit nicht an eine allgegenwärtige Unterstützung durch das Assistenzsystem gewöhnen sollte. Als Folge stünde sonst zu befürchten, dass er in seinem eigenen Absicherungsverhalten nachlässt und dies in Situationen, in denen das Assistenzsystem naturgemäß keine Warnung ausgeben kann, etwa weil der Konfliktpartner nicht mit einem Kommunikationssystem ausgestattet ist, zu einem erhöhten Unfallrisiko führt.

Wünschenswert wäre demnach eine Art elektronischer Copilot, der sowohl das Fahrzeugumfeld als auch den Fahrer beobachtet und – analog zum Verhalten eines guten menschlichen Beifahrers – Hinweise an diesen nur dann gibt, wenn es evident ist, dass der Fahrer einen wesentlichen Aspekt der aktuellen Verkehrssituation nicht wahrgenommen hat. Erste Ansätze zur Umsetzung eines derartigen Copiloten wurden im Rahmen des Projekts erarbeitet und in /23/ vorgestellt.

3.6.3.3 Methoden der Situationsanalyse für Kreuzen und Amerikanisches Abbiegen

Die Szenarien zu den Themen Kreuzen und Abbiegen wurden von den Partnern Daimler und driveU vorgestellt. Die Situationsanalyse für die Interpretation und Risikobewertung von Kreuzungsszenarien stellt eine neuartige Kombination aus zwei Verfahren dar: 1) Kartenbasierte probabilistische Spurzuordnung und Intensionsprädiktion und 2) Prädiktion des Kollisionsrisikos und Ableitung der Warnung.

3.6.3.3.1 Überblick der eingesetzten Methoden

Im ersten Schritt der Situationsanalyse werden bei der Spurzuordnung die Wahrscheinlichkeiten der Bewegungshypothesen ermittelt, um den Hypothesenraum einzuschränken.

Die Situationsanalyse stützt sich neben Ergebnissen der Umfelderkennung auf Kontextinformationen aus einer digitalen Karte. In Ko-PER liefert die Karte beispielsweise Zu- und Abfahren einer Kreuzung sowie Fahrstreifen, Verkehrsregeln und Konfliktbereiche /26/. Die daraus generierten *Centerlines* werden unter anderem für die probabilistische Spurzuordnung /27/ und die Prädiktion der beteiligten Fahrzeuge verwendet.

Im zweiten Schritt werden nicht nur einzelne Manöver behandelt, sondern es wird unter Verwendung von Bayes-Netzen eine generische Modellierung des Kreuzungsgeschehens für die präventive Sicherheit erstellt.

Um eine Wahrscheinlichkeit für eine Kollision im Kreuzungsbereich ableiten zu können, werden Fahrzeug-Fahrzeug-Beziehungen paarweise ausgewertet. Die Überlappung der beiden Bewegungshypothesen definiert den möglichen Konfliktbereich, für den ein Kollisionsrisiko

berechnet wird /28/. Dafür werden die Belegungszeiten des Konfliktbereichs für die beiden Fahrzeuge berechnet und hierauf basierend die Situationsmerkmale Eintrittszeit (*TimeToEnter*, TTE) und Austrittszeit (*TimeToLeave*, TTL) ausgewertet. Ziel der Situationsanalyse ist es, bereits zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Bremsengriff zur Vermeidung der Kollision (*TimeToBrake* = 2s), diese mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu erkennen /29/.

3.6.3.3.2 Kartenbasierte probabilistische Spurzuordnung und Intentionsprädiktion

Aufgrund der Verarbeitung verrauschter Sensorsignale liegen nur Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für die Fahrzeuge und ihre relative Lage zu den einzelnen Fahrspuren in der Karte vor. Darüber hinaus ist beispielsweise bei einem Fahrstreifenwechselmanöver oder beim Abbiegen eine eindeutige Zuordnung nicht immer sinnvoll. Aus diesem Grund werden bei der probabilistischen Fahrstreifenzuordnung (Abbildung 114) die relativen Eigenschaften und ihre Unsicherheiten zwischen dem Fahrzeug und der Fahrstreifenrepräsentation sowie ihre zeitliche Entwicklung berücksichtigt.

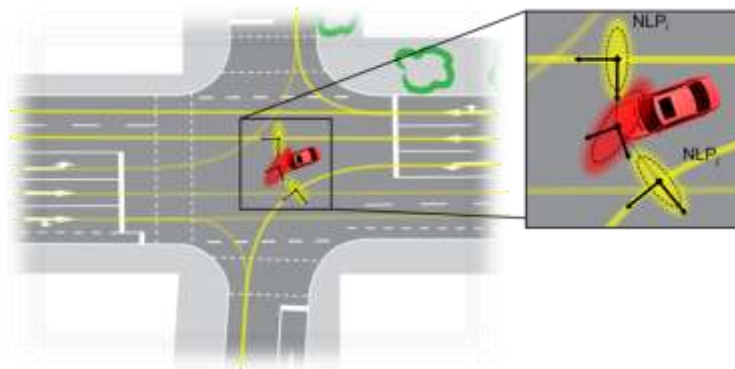


Abbildung 114: Probabilistische Fahrstreifenzuordnung mit stochastischem Modell des Fahrzeugzustands

Das Ziel besteht darin, jede mögliche Fahrbahn für ein Fahrzeug in der Karte auszuwählen und zu bewerten. Hierzu wird ein Wahrscheinlichkeitsmaß eingeführt, welches den einzelnen Fahrstreifen jeweils einen Wert zwischen 0 und 1 zuordnet. Diese Zuordnung dient gleichzeitig als Grundlage für die Hypothese, dass ein Fahrzeug sich auf dieser Fahrbahn weiter bewegen wird und damit die möglichen Bewegungshypothesen auf Grund der baulichen Gegebenheiten eingeschränkt. Hieraus ergeben sich potentielle räumliche Konfliktzonen.

Zur Kritikalitätsbewertung einer bestehenden Verkehrssituation wird ein Modell der zukünftigen Fahrzeugbewegung benötigt, um mögliche Konfliktbereiche zwischen zwei Fahrzeugen frühzeitig zu erkennen. Überschneiden sich zwei prädizierte Fahrzeugtrajektorien räumlich und zeitlich ist eine Kollision zwischen diesen Fahrzeugen möglich (Abbildung 115). Das potentielle Kollisionsgebiet wird als Konfliktbereich bezeichnet. Dessen Eingrenzung erfolgt im zweiten Schritt mit dem Bayes-Netz und der Betrachtung von Situationsmerkmalen.

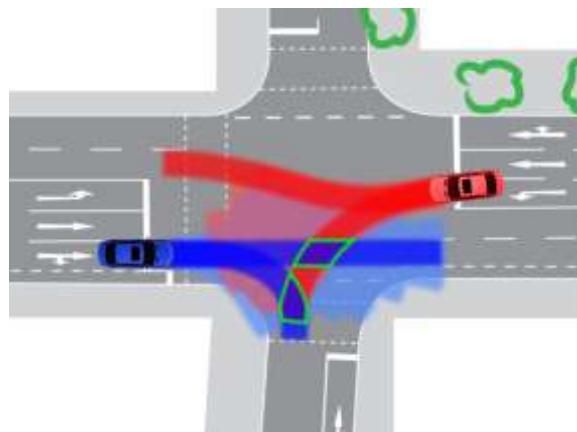


Abbildung 115: Darstellung der örtlichen Überschneidung der Bewegungsprädiktionen (grün) für zwei Fahrzeuge

Die kartenbasierte Bewegungsprädiktion setzt voraus, dass sich ein Fahrzeug entlang markierter Fahrbahnen auf einer Straße bewegt. Damit ist es möglich, die Information über den weiteren Fahrbahnverlauf für die Prognose der fortlaufenden Bewegung zu nutzen. Grundlage hierfür ist ein kinematisches Bewegungsmodell. Dabei wird im Prädiktionsalgorithmus sowohl die Unsicherheit der Sensordaten als auch die der Bewegungsvorhersage berücksichtigt.

Der Prädiktionsalgorithmus basiert auf einem erweiterten Kalman Filter. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut, zusätzliche Information in die Beschreibung eines schwach nicht-linearen Prozesses zu integrieren. Die Information der digitalen Karte wird hierbei in beiden Teilschritten des Verfahrens, Prädiktion und Innovation, in die Systembeschreibung eingebracht.

3.6.3.3.3 Kollisionsrisiko und Ableitung der Warnung

Mit Hilfe von Bayes-Netzen kann explizites Wissen, bei korrektem Umgang mit den Messunsicherheiten, repräsentiert werden. In Bayes-Netzen werden die kognitiven Fähigkeiten von Menschen mit Hilfe von Expertenwissen und Lernmethoden als kausale Abhängigkeiten dargestellt. So kann beispielsweise eine Wahrscheinlichkeit zur Bewertung der Kritikalität einer Verkehrssituation in einem speziell hierfür modellierten Bayes-Netz abgeleitet werden. Diese Wahrscheinlichkeit kombiniert menschliches Wissen und beobachtete Messdaten auf optimale Art und Weise.

Ein Bayes-Netz ist ein gerichteter azyklischer Graph. Die Knoten stellen stochastische Zustandsgrößen und die Kanten deren kausale Zusammenhänge dar. Jedem Knoten wird eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet, welche die Stärke der kausalen Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen beschreibt. Ein Bayes-Netz ist demzufolge ein probabilistisch modellbasiertes Wissenssystem, das zur Reduktion der Berechnungskomplexität führt. Dadurch ist es möglich, für Kreuzungssituationen mehrere Bewegungshypothesen aller Verkehrsteilnehmer zu analysieren und somit die kombinatorische und Interpretationsproblematik einer Situation zu lösen. Dies stellte bisher eine der größten kognitiven Herausforderung bei der Situationsinterpretation und Risikobewertung dar.

Mit der Verwendung von Bayes-Netzen wird eine kontextbezogene, kognitive Modellierung des Kreuzungsgeschehens für die präventive Sicherheit erreicht. Dabei werden alle kombinatorische Kombinationen der prädizierten Manöverhypothesen durchgerechnet und mögliche Überschneidungen der zukünftigen gefahrenen Bahnkurven überprüft, um potentielle Kollisionen vorhersagen zu können. Somit werden nicht einzelne Manöver behandelt, sondern eine Gesamtanalyse der gesamten Kreuzungssituation geleistet, welche die Situationsinterpretation und eine Risikobewertung ermöglicht.

3.6.3.4 Methoden der Situationsanalyse für Fußgängerschutz bei querenden Fußgängern

Die Früherkennung von Fußgängerintentionen und die mit dem Versenden der iDEN-PED-Nachricht verbundene Vorauswahl besonders gefährdeter Verkehrsteilnehmer können als Bestandteil der Situationsanalyse betrachtet werden. Für die zugehörige Methodik wird auf Abschnitt 3.3.2.4.6 (und das HD Video: Fußgängerintentionserkennung) verwiesen.

3.7 Neue MMI Ansätze: Frühzeitige Fahrerinformation (AP 2.900)

3.7.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Etablierte, auf fahrzeuglokaler Sensorik basierende Konzepte zur Fahrerunterstützung in Konfliktsituationen sehen vor, unter Beachtung der Fahrerreaktionszeit Kollisionen mittels Darbietung von Fahrerwarnungen zu vermeiden und ggf. autonom in die Fahrzeugführung einzugreifen. Per drahtloser Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation werden mittels Ko-PER-Technologie Informationen über das Verkehrsgeschehen gewonnen und mit der fahrzeuglokalen Umfeld-Erfassung fusioniert. Somit können im Vergleich zu alleiniger fahrzeuglokaler Sensorik potenzielle Konfliktsituationen vollständiger und früher er-

kannt werden. Dies ermöglicht zum einen die Auflösung von Verdeckungen und zum anderen eine frühzeitigere Fahrerunterstützung. Die zeitliche Struktur auf fahrzeuglokaler Sensorik basierender Warnkonzepte wird mittels kooperativer Sensorik um eine frühzeitige Informationskomponente (sog. Fahrerinformationen, engl. „*advisory warnings*“) ergänzt, ohne die bisherige Zeitstruktur etablierter Warnkonzepte (d.h. dringlicher Fahrerwarnungen, engl. „*imminent crash warnings*“) zu verändern. Die Gestaltung, Evaluation und Absicherung solcher frühzeitigen Fahrerinformationen stellen die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten zur Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) in Ko-PER dar.

3.7.2 Gewählte bzw. untersuchte Methoden / durchgeführte Arbeiten

Funktions- und MMI-Entwicklung verliefen in Ko-PER eng synchronisiert (siehe Abbildung 116). Dies stellte sicher, dass relevante Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion schon in einer frühen Projektphase aufgegriffen und durchgängig bearbeitet wurden und die entwickelten Funktionen den Fahrerbedürfnissen und -fähigkeiten in den adressierten Konfliktsituationen entsprechen.



Abbildung 116: Synchronisierte Funktions- und MMI-Entwicklung in Ko-PER.

- Letztere wurden im Rahmen einer **Bedarfs- und Anforderungsanalyse** (TAP 2.910: Bedarfs- und Anforderungsanalyse) erarbeitet und definiert.
- Basierend auf den Ergebnissen der Anforderungsanalyse wurden die zu entwickelnden **Funktionen technisch spezifiziert** und **erste Konzeptarbeiten** zur MMI-Gestaltung erarbeitet (TAP 2.920: Konzeptentwicklung und Methoden). In Vorbereitung auf die Nutzerstudien erfolgte eine **Umsetzung zeitkritischer Konfliktsituationen** in den Simulatoren der beteiligten Projektpartner.
- Begleitet wurde der Prozess der **Weiterentwicklung und Implementierung** verschiedener Informationskonzepte in den Simulatoren und den Demonstrator-Fahrzeugen der Projektpartner (TAP 2.930: MMI-Entwicklung und Implementation)
- Abschließend wurden mittels **empirischer Untersuchungen** in den Fahrsimulatoren die finalen Informationskonzepte umfassend hinsichtlich Wirksamkeit und Akzeptanz evaluiert (**TAP 2.940: Nutzerstudien im Labor und Fahrsimulator**).

In den folgenden Abschnitten werden die durchgeführten Arbeiten näher beschrieben. Die empirischen Studienergebnisse, welche auf den umfassenden Vorarbeiten zur Anforderungsanalyse, Spezifikation und Implementierung der Prüfzenarien und Ko-PER-Applikationen aufbauen, sind von besonderer Bedeutung und werden im nächsten Kapitel gesondert dargelegt.

3.7.2.1 TAP 2.910: Anforderungsanalyse und Definition der Prüfscenarien

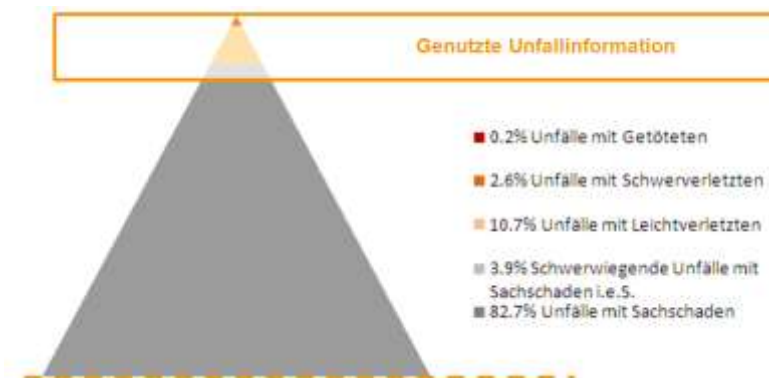


Abbildung 117: Mehr als 80% aller in Deutschland polizeilich erfassten Unfälle werden zur Abschätzung des Potenzials von Fahrerassistenzsystemen nicht herangezogen.

Ausgangspunkt für die Arbeiten zur Bedarfs- und Anforderungsanalyse war die Betrachtung aktueller Statistiken zum Unfallgeschehen in der Bundesrepublik Deutschland. Aufgezeigt wurde, dass sich die Gestaltung von Assistenzfunktionen zur Erhöhung der präventiven Sicherheit weniger an klassischen Unfallstatistiken orientieren sollte, sondern vielmehr am Fahrerunterstützungsbedarf, da

- ein direkter Bezug zwischen den klassischen und groben Klassifikationen in der offiziellen Unfallstatistik – betrachtet werden v.a. Unfallarten oder Unfalltypen – und Systemen zur Fahrerunterstützung kaum herstellbar ist, und
- sich die Bewertung der Wirksamkeit von Assistenzfunktionen nicht allein auf verfügbare Unfalldaten stützen darf, da somit ein beträchtlicher Anteil des Unfallgeschehens nicht in die Betrachtungen eingeht (siehe Abbildung 117).



Abbildung 118: Ko-PER-Anwendungsfälle, Darstellungen in den Simulatoren der BMW Group Forschung und Technik GmbH (links) und der WIVW GmbH (mittig und rechts).

Um den fahrerseitigen Unterstützungsbedarf näher zu charakterisieren und dennoch mit dem Unfallgeschehen in Verbindung zu bringen, wurden ausgehend von den amtlichen Unfallun-tertypen Ko-PER relevante Anwendungsfälle nach Fahraufgaben gruppiert. Für jeden Anwendungsfall wurden anschließend basierend auf Daten der *German In-Depth Accident Study* (GIDAS) der Jahre 1999 bis 2009 Unfalhäufigkeiten berechnet. Im Ergebnis der Anforderungsanalyse wurden sechs Anwendungsfälle definiert, d.h. sechs Gruppen von Fahraufgaben, bei denen der Fahrer basierend auf Ko-PER Kommunikationstechnologie unterstützt werden soll (siehe Abbildung 118).



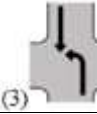

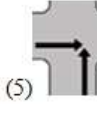

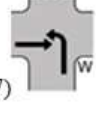

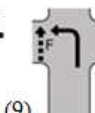

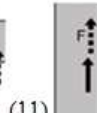
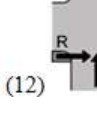

Anwendungsfall	Szenario	
1 Abstandhaltung	1-1 Auffahren in einer Kolonne	(1) 
2 Spurwechsel	2-1 Spurwechsel bei Überholvorgängen	(2) 
3 Gegenverkehr	3-1 Linksabbiegen bei Gegenverkehr	(3)  (4) 
	3-2 Vorbeifahren bei Gegenverkehr	
4 Querverkehr	4-1 Kreuzen – vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug von links	(5)  (6)  (7) 
	4-2 Kreuzen – vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug von rechts	
	4-3 Linkseinbiegen – vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug von links	
5 Fußgänger	5-1 Überschreiten	(8)  (9)  (10)  (11) 
	5-2 Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger	
	5-3 Linksabbiegender PKW – querender Fußgänger	
	5-4 Fußgänger in Längsrichtung auf der Fahrbahn	
6 Radfahrer	6-1 Kreuzender PKW – querender Radfahrer	(12)  (13) 
	6-2 Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer	

Tabelle 16: Untersuchte Anwendungsfälle und Szenarien.

Für diese Anwendungsfälle wurden in einer vertieften Unfallanalyse auf der Grundlage von GIDAS-Daten charakteristische Konfliktsituationen ermittelt und dokumentiert. Hierauf aufbauend wurden insgesamt 13 unterschiedliche Szenarien definiert und veranschaulicht (siehe Tabelle 16). Diese ausgewählten und für das Unfallgeschehen repräsentativen Konfliktszenarien dienten als Grundlage für die empirische Ermittlung des fahrerseitigen Unterstützungsbedarfs und für die Arbeiten zur Gestaltung und Evaluation der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

3.7.2.2 TAP 2.920: Konzeptentwicklung und Methoden

3.7.2.2.1 Entwicklung der Prüfumgebung

Die Umsetzungsarbeiten in der Fahrsimulation erfolgten auf Seiten des Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften in Kooperation mit dem Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (siehe Abbildung 119 für eine Darstellung der Simulatoren). Weitere Umsetzungsarbeiten wurden von der BMW Group Forschung und Technik durchgeführt.



Abbildung 119: Dynamischer und statischer Fahrsimulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften.

Als ein Ergebnis der Anforderungsanalyse wurden kritische Konfliktsituationen in der Fahrsimulation realitätsnah umgesetzt (siehe Abbildung 120). Die 13 ausgewählten Ko-PER Grundsituationen wurden in der Fahrsimulation in einer Vielzahl von Szenarienvarianten (insgesamt N=44) umgesetzt. Die Varianten ergeben sich vor allem aus den Einflussfaktoren

- Verdeckung (Konfliktpartner ist in der Anfahrt den gemeinsamen Konfliktpunkt verdeckt oder frei sichtbar);
- Vorfahrtregelung (unterstützter Fahrer ist wartepflichtig/vorfahrtsberechtigt) und Fahrtrichtung des Konfliktpartners;
- Geometrien (Innenstadt/Landstraße/Autobahn).



Abbildung 120: Umsetzung der Szenarien-Varianten – Beispiel Verdeckung im Szenario „Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger“.

In den empirischen Untersuchungen fand auch die Streckengeometrie der in Ko-PER genutzten Testkreuzung in Aschaffenburg Verwendung. Weiterhin wurde die spezifische Verkehrssteuerung der Kreuzung in der Fahrsimulation implementiert. Aufwändig nachgebildet wurde dabei auch die Randbebauung im inneren Kreuzungsbereich. Diese kann flexibel durch andere Bebauungsvarianten ausgetauscht werden, wodurch ein mehrfaches Durchfahren der Kreuzung ohne Wiedererkennungseffekte ermöglicht wird.



Abbildung 121: Nachbildung der Testkreuzung Aschaffenburg in der Fahrsimulation. Links: Kreuzung Aschaffenburg – Gebäude der Hochschule Aschaffenburg Ecke Würzburger Straße/Flachstraße. Rechts: Nachbildung der Kreuzung Aschaffenburg in der Fahrsimulation: Streckengeometrie, Verkehrssteuerung, Bebauung

3.7.2.2.2 Entwicklung von Informationskonzepten zur Fahrerunterstützung

Ausgangspunkt für die empirischen Arbeiten zur Optimierung der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle war eine umfassende Recherche einschlägiger Forschungsarbeiten. Aufgegriffen wurden mehr als 50 klassische und neuere Arbeiten bzw. Übersichtsartikel. Eine zusammenfassende Darstellung aktuell diskutierter Themenschwerpunkte wurde dokumentiert und relevante Forschungsfragen abgeleitet.

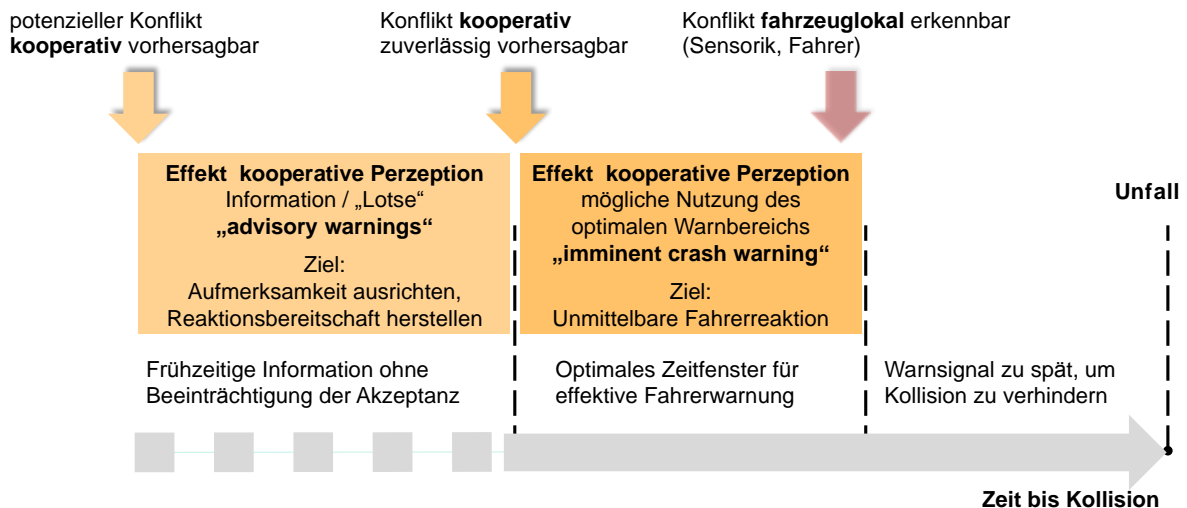


Abbildung 122: Schematische Darstellung der Zeitfenster zur Fahrerunterstützung in den letzten Sekunden vor einer Kollision

Die Ergebnisse der konzeptuellen Vorarbeiten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei der Konzeption der Fahrerunterstützung in Ko-PER wurde davon ausgegangen, dass etablierte zeitliche Warnstrukturen, die vielfach beschrieben bzw. untersucht wurden, beibehalten werden, um eine konsistente Nachrichtenübermittlung an den Fahrer zu gewährleisten (siehe Abbildung 122). Um Falschwarnungen zu minimieren, werden in heutigen Systemen häufig sehr späte Warnzeitpunkte gewählt. Unter der Annahme, dass Konflikte auf der Basis kooperativer Perzeption zuverlässiger bzw. vollständiger erkannt werden können, kann die Ko-PER-Technologie dazu beitragen, den optimalen Warnbereich effektiver zu nutzen. Dies ermöglicht dem Fahrer, bei der Konfliktentschärfung selbst noch aktiv zu werden, wodurch die Notwendigkeit autonomer Eingriffe minimiert werden könnte.
- Über das Zeitfenster für dringliche Fahrerwarnungen hinaus, könnte die Darbietung frühzeitiger Informationen (engl. „advisory warnings“) zur Konfliktvermeidung beitragen. Diese Informationen sollen die Aufmerksamkeit des Fahrers auf einen potenziellen Konflikt richten und Reaktionsbereitschaft herstellen. Die Herausforderung in der Gestaltung frühzeitiger Informationen liegt an dieser Stelle in der Entscheidung über die Weitergabe einer Information, die zwar technisch erfassbar, möglicherweise aber unzuverlässig ist – oder aber unnötig, da der Fahrer die Situation bereits erfasst hat, was sich somit negativ auf die Effektivität und Akzeptanz auswirken könnte.
- Grundlage für die Ausgabe eines Informations- oder Warnsignals an den Fahrer stellt hierbei die sog. Situationsanalyse dar. Informationen über das Verkehrsgeschehen, insbesondere Position und Geschwindigkeit von relevanten Verkehrsteilnehmern, werden hierbei in Beziehung zueinander gesetzt und fortlaufend bewertet (z.B. anhand von zeitbasierten Kritikalitätsmaßen wie *Time-to-collision*, *Time-to-brake*, etc.). Basierend hierauf kann die Assistenzstrategie priorisiert werden (z.B. Information bei noch geringer Situationskritikalität, dringliche Warnung bei hoher Kritikalität). Eine Anpassung der Informationsstrategie an die Möglichkeiten und Grenzen dieser probabilistischen Situationsprognose bietet ein großes Potenzial zur Vermeidung der Weitergabe falscher oder fehlerhafter Informationen an den Fahrer. In Anbetracht der Komplexität der Ko-PER-Anwendungsfälle (z.B. Unfälle im Kreuzungsbereich, Schutz verletzlicher Verkehrsteilnehmer) ist beispielsweise von Bedeutung, zu welchem Zeitpunkt vor einem prädizierten Konflikt oder wie spezifisch Fahrer über die bevorstehende Konfliktsituationen zu informieren sind.

Diese an dieser Stelle nur grob umrissenen technischen Anforderungen finden ihre Entsprechungen in der Forschungsliteratur zur Gestaltung effektiver und verhaltenswirksamer Fahrerinformationen. Ausgehend von der Literaturübersicht wurden in den empirischen Arbeiten relevante Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion aufgegriffen, beispielsweise die Frage geeigneter **Zeitfenster, Modalität und Spezifität** für effektive Fahrerinformationen sowie Auswirkungen von **Fehl- und Falschinformationen** im Fehlerfall.

3.7.2.3 TAP 2.930: MMI-Entwicklung und Implementation

Aufbauend auf den konzeptuellen Vorarbeiten wurden Mensch-Maschine-Schnittstellen entwickelt und in der Fahrsimulation der Projektpartner sowie im Versuchsträger des Projektpartners BMW Forschung und Technik GmbH zunächst prototypisch und zu späteren Projektzeitpunkten final umgesetzt. Abbildung 123 stellt beispielhaft die Umsetzung einer konflikt- und richtungsspezifischen Variante der Fahrerinformation im kontaktanalogen Head-Up-Display (HUD) dar. Als Grundlage für die Implementierung der Schnittstellen-Elemente in der Fahrsimulation wurde zusammen mit Vertretern der AG Fahrzeuge (BMW, CSEI und Daimler) eine Grobspezifikation der Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Fahrerunterstützung in den Ko-PER relevanten Verkehrssituationen erarbeitet. Die o.g. Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion wurden anschließend in aufwändigen Untersuchungen in den Fahrsimulatoren der beteiligten Projektpartner mit dem Ziel der Optimierung und Absicherung der Schnittstellen untersucht. Auf die einzelnen empirisch untersuchten MMI-Varianten wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.



Abbildung 123: Beispielhafte Umsetzung einer kontaktanalogen Anzeige im HUD in der Fahrsimulation (links) und im Versuchsträger (rechts) der BMW Forschung und Technik GmbH

3.7.2.4 TAP 2.940: Nutzerstudien in Labor und Fahrsimulator

Zur Ausgestaltung und Absicherung der Ko-PER Mensch-Maschine-Schnittstelle wurden mehrere aufeinander aufbauende Studien durchgeführt. Zum einen wurden empirische Untersuchungen zur **Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle** (siehe Abbildung 124) realisiert. Dieser Teil der Forschungsarbeiten setzte den Schwerpunkt darauf, in welcher Form verhaltenswirksame und effektive Informationen an den Fahrer weitergegeben werden sollen, um gleichzeitig die Möglichkeiten und Grenzen der Erfassung und Prädiktion der jeweiligen Konfliktsituationen zu beachten.

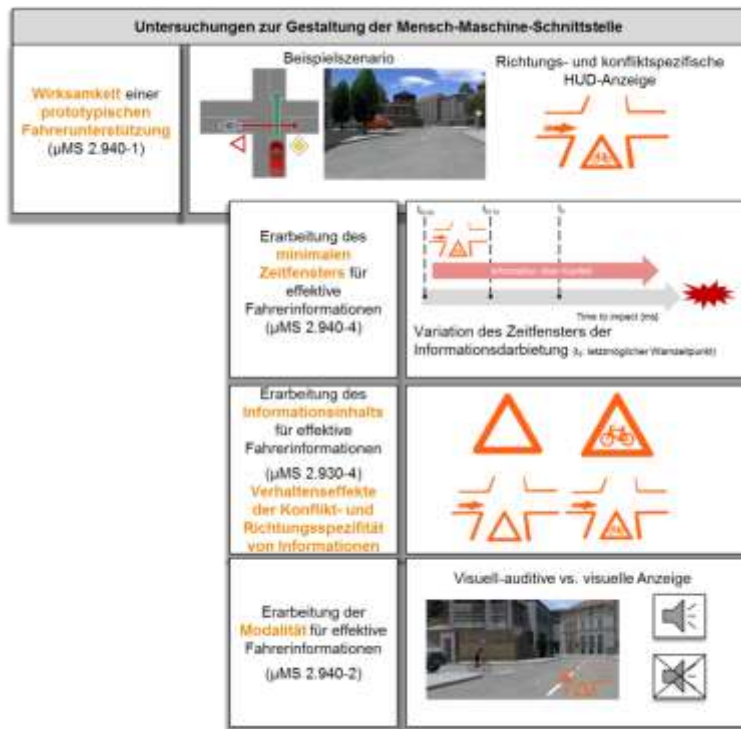


Abbildung 124: Aufbau der Studienreihe zur Ausgestaltung der Ko-PER Mensch-Maschine Schnittstelle

Die Studienreihe setzte sich zusammen aus der Ermittlung

- des fahrerseitigen **Unterstützungsbedarfs** in den Ko-PER-relevanten Szenarien sowie der **Wirksamkeit einer prototypischen Fahrerunterstützung**;
- des effektiven **Informationszeitpunkts**;
- der **Spezifität** und **Modalität** effektiver Fahrerinformationen;

Neben der Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle bildete deren **Absicherung** einen weiteren Studienschwerpunkt: Während der Fokus in den o.g. Studienteilen darin bestand, die an den Fahrer übermittelten Signale möglichst robust gegenüber Unzulänglichkeiten der Situationserkennung und -prädiktion und gleichzeitig effektiv zu gestalten, wurden in den weiteren MMI-Arbeiten die Auswirkungen möglicher **Fehl- und Falschinformationen** auf die Fahrerreaktion und Akzeptanz behandelt (siehe Abbildung 125):

- Einfluss **falscher und unnötiger** Informationen;
- Effekte **fehlerhafter Richtungsanzeigen** in Fahrsituationen mit **Einfach-** und **Mehrfachkonflikten**;



Abbildung 125: Aufbau der Studienreihe zur Absicherung der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

3.7.3 Ergebnisse empirischer Untersuchungen

3.7.3.1 Studie I: Ermittlung des fahrerseitigen Unterstützungsbedarfs und Wirksamkeit einer prototypischen Fahrerunterstützung

Vorgehen: In dieser Untersuchung durchfuhren N = 20 Fahrer alle definierten Ko-PER Szenarien in verschiedenen Sichtbedingungen (verdeckt vs. unverdeckt) und in Varianten unterschiedlicher Vorfahrtsregelung und Streckengeometrie. Insgesamt wurden 22 Szenarienvarianten mit und ohne prototypische Fahrerunterstützung untersucht. Diese bestand in der Darbietung frühzeitiger Fahrerinformationen über bevorstehende Konfliktsituationen zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt (t_0)²⁰ im simulierten Head-Up Display (HUD). Ziel des Versuchs war die Ermittlung des fahrerseitigen Unterstützungsbedarfs sowie der Wirksamkeit der prototypischen Fahrerunterstützung.

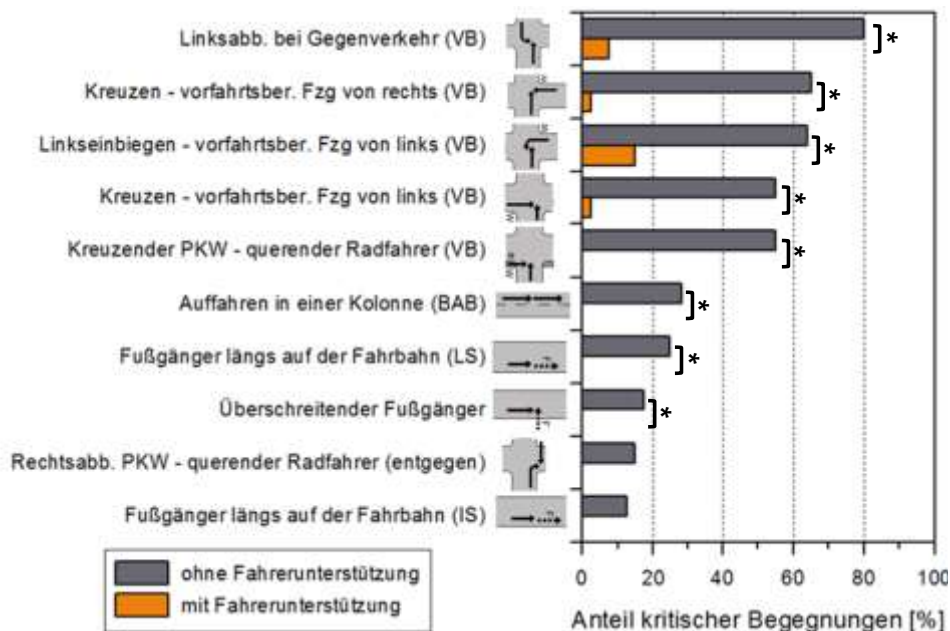


Abbildung 126: Bestimmung des Unterstützungsbedarfs und Wirkung der prototypischen Fahrerunterstützung – Anteil kritischer Begegnungen in Szenarien-Varianten mit Unterstützungsbedarf. (VB = unterstützter Fahrer ist vorfahrtsberechtigt; BAB = Bundesautobahn; LS = Landstraße; IS = Innenstadt; entgegen = Radfahrer nähert sich aus entgegengesetzter Fahrtrichtung). * = signifikanter Unterschied zwischen Fahrt mit und ohne Unterstützung ($p < .05$)

²⁰ Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Fahrer nach einer Reaktionszeit von einer Sekunde mit einer konstanten Verzögerung von -8 m/s^2 bremst.

In einem eigens für diese Versuchssituationen entwickelten Verfahren zur Konfliktbewertung wurde der Assistenzbedarf in den implementierten Szenarienvarianten definiert: Die Auftrenshäufigkeiten von Unfällen und Konflikten²¹ in den Fahrten ohne Fahrerunterstützung spiegeln das Konfliktpotenzial und damit gleichzeitig den Unterstützungsbedarf der jeweiligen Situation wider. Treten ohne Fahrerunterstützung keine Unfälle und / oder Konflikte auf, ergibt sich kein Unterstützungsbedarf – die Fahrer bewältigen die Situation sicher. Je mehr Unfälle und / oder Konflikte auftreten, desto höher ist der Unterstützungsbedarf.

Ergebnisse: Abbildung 126 zeigt in absteigender Häufigkeitsreihenfolge diejenigen zehn Szenarienvarianten, in denen es zu kritischen Begegnungen mit dem jeweiligen Konfliktpartner kam. Mit einem Anteil kritischer Begegnungen von mindestens 50% zeigte sich das größte Konfliktpotenzial für Kreuzungssituationen, in denen dem Fahrer die Vorfahrt durch den Konfliktpartner genommen wurde. In diesen Situationen werden Fahrererwartungen verletzt und Fahrerunterstützung wird somit notwendig. Weiterhin ergab sich ein Unterstützungsbedarf für einige der Szenarienvarianten mit verletzlichen Verkehrsteilnehmern. Für alle zehn Szenarienvarianten zeigte sich zusätzlich deutlich die durch die prototypische Fahrerunterstützung erreichte Reduktion der Anzahl kritischer Begegnungen. Insbesondere bei Kreuzungskonflikten konnte der hohe Anteil an Konfliktsituationen drastisch gesenkt werden. Entsprechend den Wirksamkeitsergebnissen wurden die Fahrerinformationen in den meisten Szenarien als mittel bis sehr hilfreich bewertet, wobei die Nützlichkeit der Fahrerinformationen gerade in überraschenden Situationen besonders hoch eingeschätzt wurde.

Die erzielten Ergebnisse stellen in besonderem Maße das Potenzial kooperativer Umfelderkennung für die Steigerung der aktiven Sicherheit im Straßenverkehr heraus. Abbildung 127 stellt die Häufigkeit kritischer Begegnungen in den untersuchten innerstädtischen Konfliktsituationen und die Verteilung der entsprechenden innerstädtischen Unfalltypen aus der amtlichen Unfallstatistik (Statistisches Bundesamt, 2012) gegenüber.

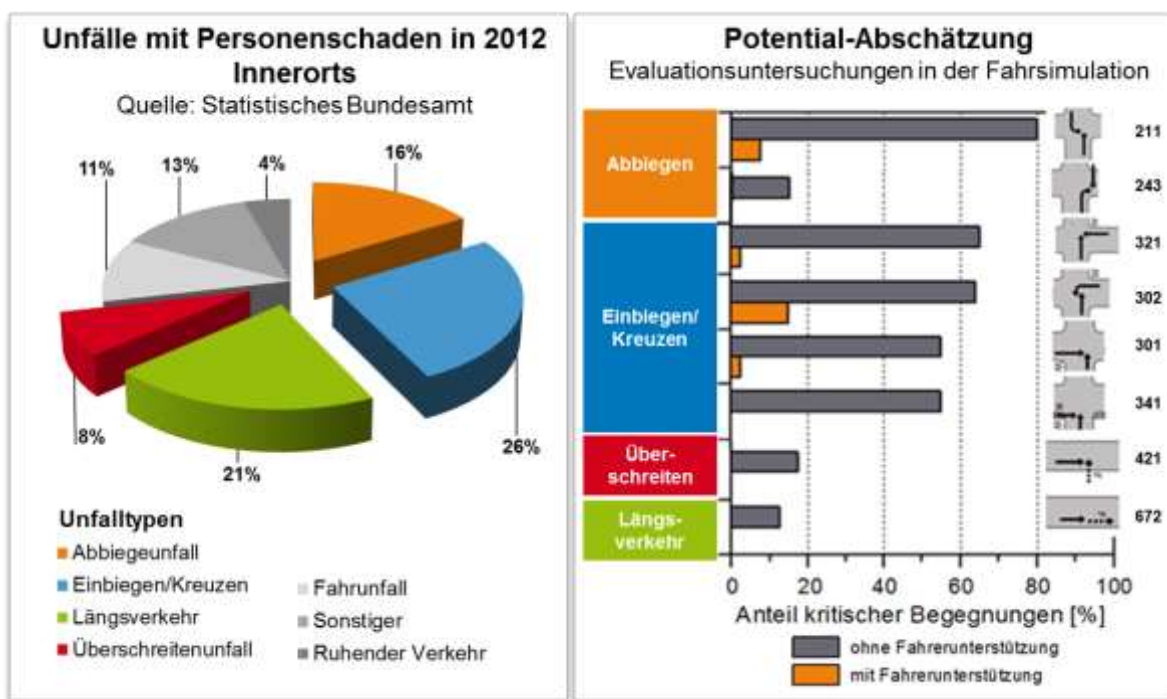


Abbildung 127: Verteilung der innerstädtischen Unfälle in Deutschland in 2012 (Statistisches Bundesamt, 2013) und Ergebnisse zur Abschätzung des Potenzials kooperativer Umfelderkennung aus der Fahrsimulation (Anteil kritischer Begegnungen mit und ohne frühzeitige Fahrerinformationen).

²¹ Konflikte werden über eine Kombination aus subjektiven („gefährlich“-Urteil der Probanden) und objektiven (TTA/TTC_{min} < 1s) Parametern der Situationskritikalität sowie weiteren Parametern der Fahrzeugdynamik bestimmt.

Es ist ersichtlich, dass sich in den für diese Unfalltypen repräsentativen Prüfsituationen in der Fahrsimulation durchweg eine deutliche Entschärfung durch die auf kooperativer Umfelderkennung beruhende Fahrerunterstützung ergibt (siehe Abbildung 127).

3.7.3.2 Studie II: Untersuchung zum Informationszeitpunkt

Vorgehen: Zur Ausgestaltung Mensch-Maschine-Schnittstelle für Ko-PER-Applikationen war das Zeitfenster für effektive Fahrerinformationen festzulegen. Informationen über drohende Konfliktsituationen sollen hierbei so früh wie nötig, jedoch so spät wie möglich an den Fahrer übermittelt werden, um mögliche Ablenkungseffekte zu vermeiden und eine größtmögliche Zuverlässigkeit der Fahrerunterstützung zu gewährleisten. Für eine Auswahl von sechs Ko-PER-Szenarien (vgl. Tabelle 17) wurde dies experimentell untersucht: Fahrerinformationen wurden hierfür zu verschiedenen Zeitpunkten in der Anfahrt an die Konfliktsituation dargeboten (bis zu knapp vier Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt (t_0) in fünf Abstufungen).

Szenario	Übersicht	HUD-Anzeige
Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger (5-2)		
Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer (6-2)		
Linksabbiegen bei Gegenverkehr (3-1)		
Kreuzen – vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug von rechts (4-1)		
Überschreiten (5-1)		
Auffahren in einer Kolonne (1-1; BAB)		

Tabelle 17: Übersicht über untersuchte Szenarien.

Ergebnisse: Es ereigneten sich keine kritischen Begegnungen in den untersuchten Szenarien, in welchen die Möglichkeit zur Antizipation kritischer Ereignisse gegeben ist (Szenario Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger (5-2) und Rechtsabbiegender PKW – querender Radfahrer (6-2, gleich)). Für die übrigen Szenarien sind die Anteile kritischer Begegnungen an den gültigen Fahrten in Abbildung 128 dargestellt. Es wurde deutlich, dass Unterstützung zum letztmöglichen Warnzeitpunkt (t_0) keine Verringerung der Situationskritikalität gegenüber Fahrten ohne Fahrerunterstützung mit sich bringt. Eine Vergrößerung des Informationszeitfensters um eine Sekunde (t_{0+1s}) ging allerdings mit einer deutlichen Reduktion des Anteils kritischer Begegnungen einher. Bei noch früherer Informationsdarbietung (ab t_{0+2s}) kamen kritische Situationen nur noch vereinzelt zustande. Als Zeitfenster für effektive Fahrerinformationen kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse eine Zeit von mindestens einer Sekunde, bestenfalls zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt empfohlen werden. Die Probanden selbst präferierten konsistent über die untersuchten Szenarien hinweg, zwei bis drei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt über drohende Konfliktsituationen informiert zu werden.

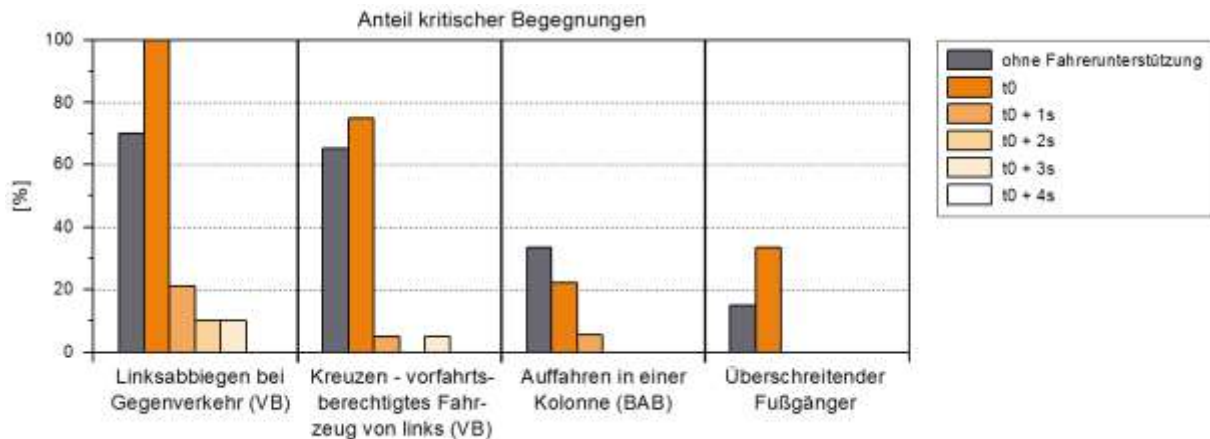


Abbildung 128: Anteil kritischer Begegnungen. (VB = unterstützter Fahrer ist vorfahrtsberechtigt; BAB = Bundesautobahn).

3.7.3.3 Studie III: Untersuchung der Spezifität frühzeitiger Fahrerinformationen

Vorgehen: Untersuchungsgegenstand war die Auswirkung der Spezifität von frühzeitigen Fahrerinformationen (d.h. der Inhalte der an den Fahrer kommunizierten Informationen). N = 21 Fahrer wurden in einem Fahrsimulator-Versuch in verschiedenen kritischen Konfliktsituationen im Längs- und Querverkehr über drohende Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern visuell-auditiv (d.h. Anzeige im simulierten HUD und ankündigender Ton, siehe Abbildung 129 rechts) informiert. Die Fahrerinformation variierte hierbei in ihrer Spezifität (siehe Abbildung 129 links) und dem Zeitpunkt der Informationsdarbietung (Darbietung zum letztmöglichen Warnzeitpunkt vs. zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt).

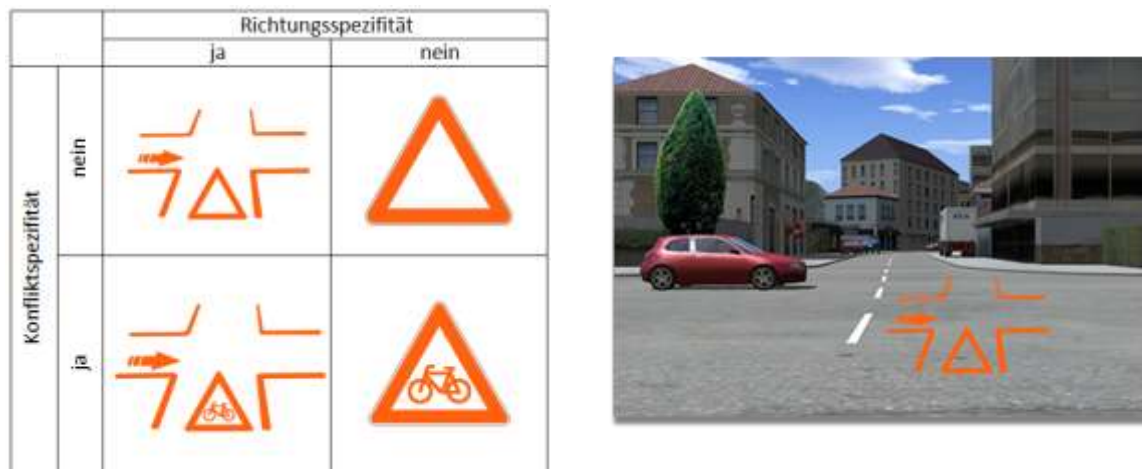


Abbildung 129: Untersuchte visuelle Anzeigenvarianten der Mensch-Maschine-Schnittstelle (links) und Darstellung im Fahrsimulator der WIVW GmbH (rechts).

Ergebnisse: Die Ergebnisse machen deutlich, dass der zeitlichen Struktur von Fahrerinformationen eine größere Bedeutung für deren Wirksamkeit zukommt als deren Spezifität:

- **Effekt Zeitpunkt:** Die Fahrer reagieren unabhängig von der Spezifität der Anzeigen mit einer (moderaten) Geschwindigkeitsreduktion, sofern sie frühzeitig über drohende Konfliktsituationen informiert werden. Folglich sinken objektive und subjektive Situationskritikalität bei frühen Fahrerinformationen (zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt) gegenüber Informationen zum letztmöglichen Warnzeitpunkt deutlich.
- **Effekt Spezifität:** Eine spezifische Anzeige der Richtung des drohenden Konflikts bringt gerade in Szenarien mit kreuzendem oder abbiegendem Konfliktpartner gegenüber Konfliktsituationen im Längsverkehr eine zusätzliche Situationsentschärfung mit sich. Deren

Einfluss ist jedoch geringer einzuschätzen als derjenige des Informationszeitpunkts (siehe Abbildung 130 rechts).

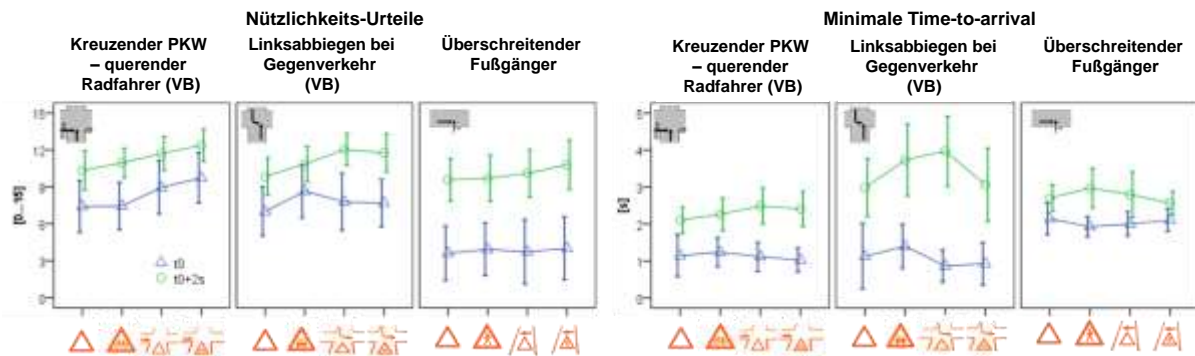


Abbildung 130: Nützlichkeitsurteile (links) und minimale Time-to-arrival (rechts). (VB = unterstützter Fahrer ist vorfahrtsberechtigt; BAB = Bundesautobahn; eine schematische Darstellung der Prüfscenarien findet sich Tabelle 17).

Allerdings hat die Spezifität der Fahrerinformationen eine deutliche Auswirkung auf deren **Akzeptanz** (siehe Abbildung 130 links): Auch wenn sich hierfür teilweise kein objektiver Nutzen aus dem Fahrverhalten ableiten lässt, bevorzugen Fahrer spezifische gegenüber unspezifischen Informationen. Vor allem richtungsspezifische Informationen werden in nahezu allen Untersuchungsszenarien gegenüber richtungsunspezifischen Informationen als hilfreicher bewertet.

3.7.3.4 Studie IV: Modalität und Einfluss falscher und unnötiger Informationen

Dieser Studienteil umfasst eine Fahr Simulator-Studie mit N = 81 Probanden zur abschließenden Evaluation der in den bisherigen Forschungsarbeiten definierten Mensch-Maschine-Schnittstelle. Hierbei wurde diese gemäß den bisherigen Studienergebnissen angepasst: Die Fahrer wurden eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt mittels einer richtungsspezifischen HUD-Anzeige über bevorstehende Konfliktsituationen informiert. Die Untersuchung bestand aus mehreren Studienteilen:

Studienteil I

Vorgehen: Im Studienteil I standen die Wirksamkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie deren Modalität im Mittelpunkt. Die Probanden wurden mit vier kritischen Verkehrsszenarien mit und ohne Fahrerunterstützung unterschiedlicher Modalität (visuell-auditiv vs. rein visuell) konfrontiert (siehe Abbildung 131).



Abbildung 131: Untersuchte Szenarien und MMI-Varianen.

Ergebnisse: Zusammengefasst stellen sich sowohl visuell-auditive als auch rein visuelle Fahrerinformationen als wirksam heraus.

- Die Probanden reagierten erwartungsgemäß schneller auf visuell-auditive als auf rein visuelle Fahrerinformationen und begannen in größerer Distanz zum jeweiligen Konfliktpunkt mit dem Bremsen. Bei rein visueller Fahrerinformation bremsten die Probanden stärker ab, was sich teilweise durch die längere Bremsreaktionszeit erklären lässt. In der

Folge senkten visuell-auditive und rein visuelle Fahrerinformationen die objektive Situationskritikalität gegenüber der Baseline-Fahrt deutlich (siehe Abbildung 132).

- Entsprechend der deutlichen Wirksamkeit der frühzeitigen Fahrerinformationen ergaben sich für beide Systemauslegungen hohe Akzeptanz-Werte (Nutzungsabsicht ca. 90%), bei gleichzeitig niedrigen Einschätzungen der Zusatzbeanspruchung durch die Fahrerinformationen.

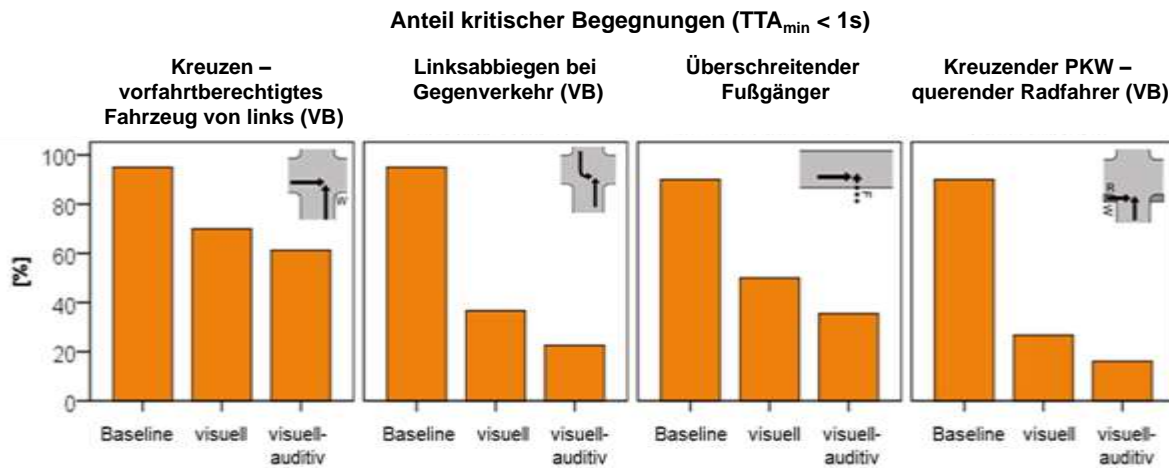


Abbildung 132: Anteil kritischer Begegnungen ($TTA_{\min} < 1s$), Studienteil I. (VB = unterstützter Fahrer ist vorfahrtsberechtigtes Fahrzeug von links; eine schematische Darstellung der Prüfscenarien findet sich in Tabelle 17).

Studienteil II

Vorgehen: Im Studienteil II wurden die Auswirkungen verschiedener Arten von Falschinformationen untersucht (falsche Information: Information, obwohl kein potenzieller Konfliktpartner anwesend ist; unnötige Information: potenzieller Konfliktpartner ist anwesend, hält jedoch in der Anfahrt an den Konfliktpunkt an). Hierzu wurde unter Beibehaltung der jeweiligen Assistenzbedingung (visuell-auditiv/visuell) die Zuverlässigkeit der Fahrerunterstützung variiert (100% zuverlässig vs. 60% zuverlässig mit falschen Informationen (FI) oder unnötigen Informationen (UI)).

Ergebnisse: Zusammengefasst lässt sich hinsichtlich der Auswirkungen falscher und unnötiger Informationen auf die Wirksamkeit und Akzeptanz der Mensch-Maschine-Schnittstelle Folgendes festhalten (siehe Abbildung 133):

- Bei visuell-auditiver Unterstützung zeigten sich zu erwartende Verhaltenseffekte falscher Informationen: Die Probanden reagierten verglichen mit der Fahrerunterstützung mit stets korrekten Fahrerinformationen verzögert und begannen in kleinerem Abstand zum jeweiligen Konfliktpunkt mit dem Bremsen²². Im Gegensatz dazu führten unnötige Informationen gemessen an den TTA_{\min} -Werten sogar zu einer Steigerung der Wirksamkeit der Fahrerunterstützung. Eine Minderung der Wirksamkeit durch falsche Informationen tritt nur in einem der vier Untersuchungsszenarien auf.
- Bei rein visueller Fahrerunterstützung beeinflusst die Zuverlässigkeit der Informationen die Fahrerreaktionen und deren Wirksamkeit nicht. Insgesamt reagieren die Probanden gegenüber der visuell-auditiven Fahrerinformationen stets mit einer späteren, aber intensiveren Bremsreaktion.

²² Es ist jedoch anzumerken, dass der berichtete Unterschied mit ca. 130ms vor dem Hintergrund, dass die Fahrerunterstützung frühzeitig erfolgt, als relativ klein angesehen werden kann.

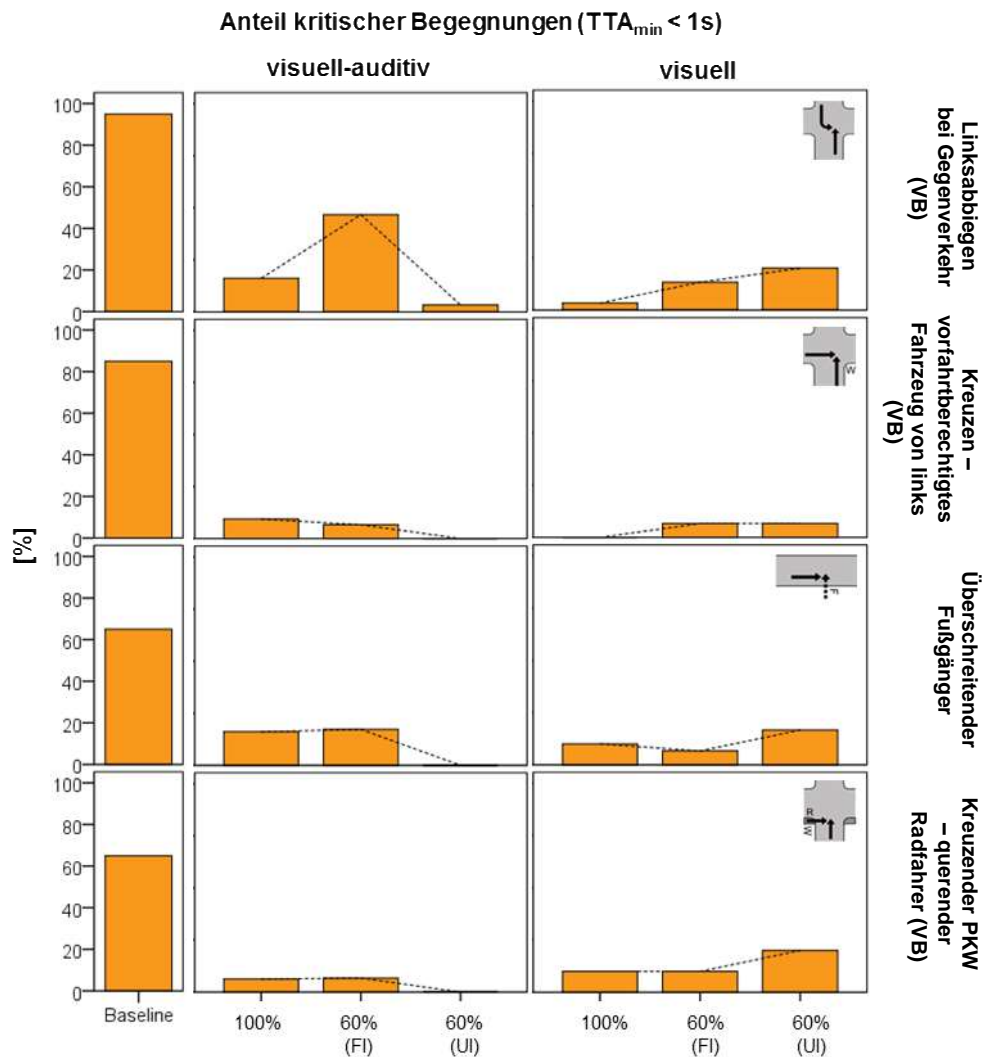


Abbildung 133: Anteil kritischer Begegnungen ($TTA_{\min} < 1s$), Studienteil II. Dargestellt sind die Anteile kritischer Begegnungen in den untersuchten Konfliktsituationen, wobei die Fahrer entweder nicht unterstützt wurden (Baseline), mit stets korrekten Fahrerinformationen (100%) oder mit Fahrerinformationen mit falschen und unnötigen Informationen (60% FI/UI). (VB = unterstützter Fahrer ist vorfahrtsberechtigt).

Insgesamt zeigt sich durch frühzeitige Fahrerinformationen unabhängig von deren Modalität (visuell-auditiv oder visuell) und Zuverlässigkeit eine deutliche Entschärfung der Situationskritikalität in objektiven und subjektiven Parametern gegenüber der nicht-assistierten Fahrt. Gleichzeitig findet die Fahrerunterstützung hohe Akzeptanz (Nutzungsabsicht ca. 80% trotz Unzuverlässigkeit). Insbesondere falsche Informationen führten jedoch zu signifikanten Einbußen in verschiedenen Akzeptanz-Aspekten, wie etwa der Einschätzung der Nützlichkeit und Leichtigkeit der Benutzung der Fahrerinformationen, wenn diese visuell-auditiv an den Fahrer übermittelt werden.

3.7.3.5 Studie V: Einfluss falscher Richtungsanzeigen

Vorgehen: Die in Ko-PER durchgeführten Arbeiten zur Mensch-Maschine-Interaktion wurden mit einer Untersuchung zur Absicherung der Schnittstelle abgeschlossen. In dieser Teilstudie stand die Frage im Mittelpunkt, inwiefern fehlerhafte Richtungsanzeigen einen negativen Einfluss auf das Fahrerverhalten, die Wirksamkeit und Akzeptanz der Mensch-Maschine-Schnittstelle haben. Um diese Versuchsfrage zu beantworten, wurden die Probanden in den Prüfsituationen eine Sekunde vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt jeweils entweder mit einer Richtungsanzeige falscher Richtung oder mit einer unspezifischen Anzeige unterstützt.

Die Probanden wurden mit insgesamt sechs Konfliktsituationen konfrontiert, in denen die durch die Fahrerunterstützung ausgegebenen Richtungsinformationen über drohende Verkehrskonflikte fehlerhaft waren (d.h. Anzeige der falschen Konfliktrichtung). Die Fahrerinformationen wurden hierbei visuell oder visuell-auditiv dargeboten und die Konfliktsituationen setzten sich aus Einfach- und Mehrfachkonflikten zusammen (d.h. ein weiterer potenzieller Konfliktpartner ist anwesend oder nicht).

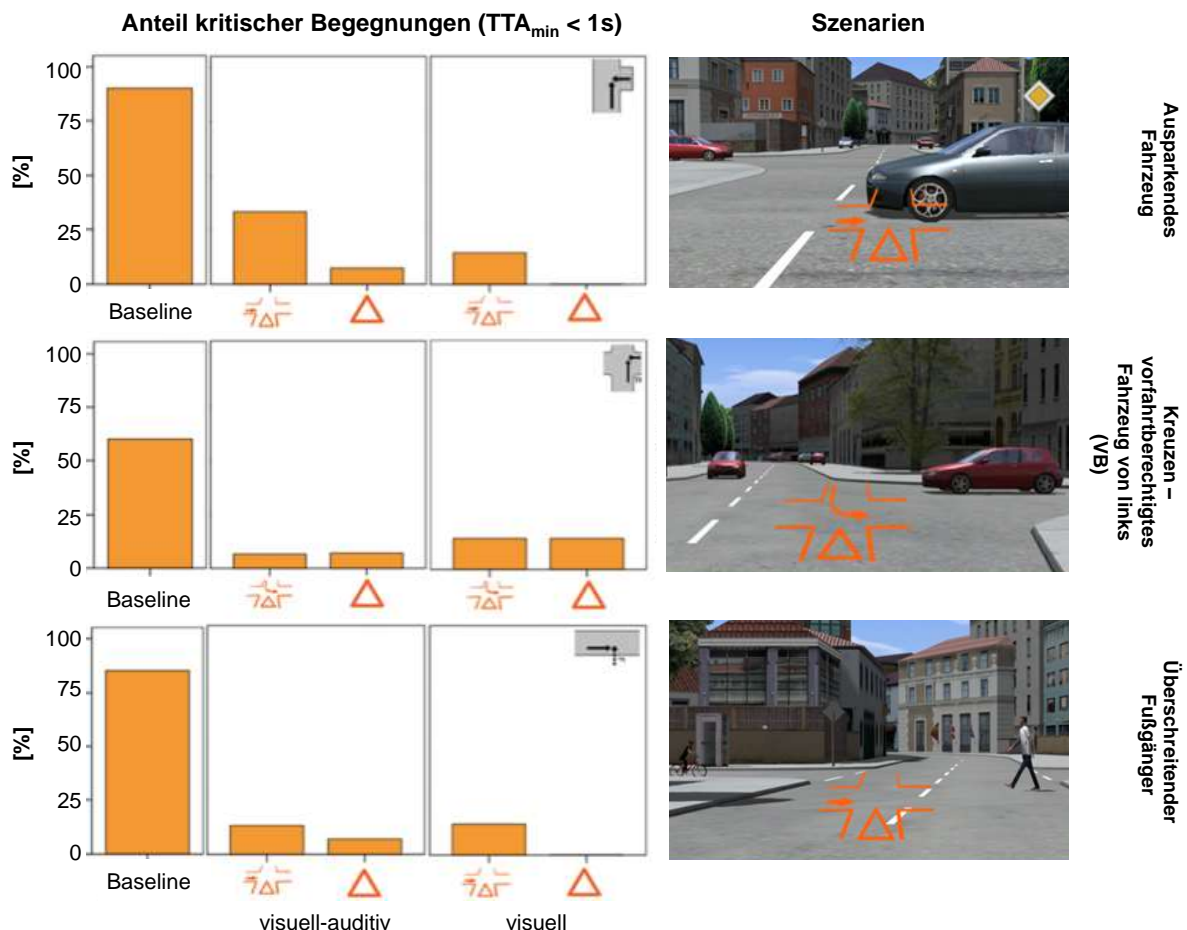


Abbildung 134: Anteil kritischer Begegnungen in den untersuchten Mehrfachkonflikten (links) und Veranschaulichung der Szenarien (rechts; in den Konfliktszenarien wird durch die Fahrerinformation jeweils auf den falschen Konfliktpartner hingewiesen).

Ergebnisse: Die Untersuchungsergebnisse sprechen zusammengenommen dafür, dass fehlerhafte Richtungsanzeigen zwar keinen bedeutsamen negativen Einfluss auf die Fahrerreaktion haben, jedoch Akzeptanz und Nutzungsabsicht negativ beeinflussen können:

- **Fahrerreaktion:** In keiner der untersuchten Prüfsituationen fand sich ein negativer Einfluss der falschen Richtungsanzeigen auf die Fahrerreaktion (Bremsbeginn, Bremsreaktionszeit und maximale Bremspedalstellung).
- **Situationskritikalität:** Abbildung 134 stellt den Anteil kritischer Begegnungen in den untersuchten Mehrfachkonflikten dar. In lediglich einer von insgesamt sechs Prüfsituationen war die Wirksamkeit unspezifischer Fahrerinformationen höher als diejenige (fehlerhaft) richtungsspezifischer Informationen (Szenario „Ausparkendes Fahrzeug“, siehe Abbildung 134). Verglichen mit der nicht-assistierte Fahrt fand sich jedoch konsistent in allen Prüfsituationen objektiv wie subjektiv eine Konfliktschärfung, auch bei fehlerhaften Richtungsanzeigen.
- **Akzeptanz:** Obwohl sich keine Einschränkung der Wirksamkeit der Fahrerunterstützung infolge falscher Richtungsanzeigen fand, kommt es zu sichtbaren Einschränkungen in der Akzeptanz. Erwartungsgemäß werden fehlerhafte Richtungsanzeigen

in den meisten Prüfsituationen als weniger hilfreich eingeschätzt als unspezifische Anzeigen. Akzeptanzaspekte wie Nützlichkeit („*Usefulness*“), Gebrauchssicherheit („*Safety of Use*“) und Leichtigkeit der Benutzung („*Ease of Use*“) werden bei gelegentlich auftretenden fehlerhaften Richtungsanzeigen geringer eingeschätzt als bei unspezifischen Fahrerinformationen.

3.7.3.6 Zusammenfassung zu Abschnitt 3.7

Zusammenfassend können für frühzeitige Fahrerinformationen über drohende Konfliktsituationen folgende grundlegenden Gestaltungsempfehlungen gegeben werden:

- **Zeitpunkt:** Darbietung eine bis zwei Sekunden vor dem letztmöglichen Warnzeitpunkt. Noch frühere Informationszeitpunkte führen nicht zu einer weiteren Steigerung der Fahrsicherheit.
- **Spezifität:** Verwendung richtungsspezifischer Anzeigen (d.h. Anzeige der jeweiligen Konfliktrichtung). Falls mit dem Vorkommen falscher Richtungsanzeigen zu rechnen ist, sollten jedoch besser unspezifische Anzeigen gewählt werden, um eine Einschränkung der Akzeptanz zu vermeiden.
- **Modalität:** Ausgabe rein visueller Fahrerinformationen. Visuell-auditive Fahrerinformationen führen zwar zu schnelleren Fahrerreaktionen, die allerdings in Anbetracht der Frühzeitigkeit der Fahrerunterstützung keinen bedeutsamen Einfluss auf deren Wirksamkeit, jedoch im Fall von falschen Informationen die Akzeptanz negativ beeinflussen.

Im Hinblick auf die **Auswirkungen von Fehl- und Falschinformationen** wurden ebenfalls umfangreiche Arbeiten durchgeführt. Insgesamt kann festgehalten werden, dass

- **Falschinformationen** vor allem dann einen negativen Einfluss auf die Fahrerreaktion und Akzeptanz haben, wenn diese ohne offensichtlichen Grund an den Fahrer übermittelt werden (sog. falsche Informationen). Falls diese jedoch von den Fahrern nachvollzogen werden können (sog. unnötige Informationen), tritt dieser Akzeptanzeinschränkende Effekt nicht ein.
- **fehlerhafte Richtungsanzeigen** (d.h. Anzeige der falschen Konfliktrichtung) zwar keine bedeutsame Wirksamkeitseinschränkung nach sich ziehen, jedoch ebenfalls die Akzeptanz der Fahrer beeinträchtigen können.

Zusammengenommen ermöglichen die Studienergebnisse eine Bewertung der Möglichkeiten zur Steigerung der aktiven Fahrzeugsicherheit durch kooperative Umfelderkennung, die weit über konventionell vorgenommene, d.h. Unfalldaten-basierte, Wirksamkeitsabschätzungen hinausgehen. Es wurden in umfassenden Nutzerstudien sowohl Gestaltungsempfehlungen erarbeitet, welche explizit auf die Minimierung der Prädiktionsunsicherheit kooperativer Sensorik ausgelegt sind (z.B. Mindestanforderung an Zeitpunkt und Spezifität der an den Fahrer übermittelten Information) als auch umfassende Arbeiten zur Abschätzung möglicher Grenzen der Prädiktion und Übermittlung kritischer Verkehrssituationen (z.B. Abschätzung der möglichen Wirksamkeitseinschränkung durch falsche Alarme oder fehlerhafte Richtungsanzeigen) durchgeführt.

3.8 Realisierte Fahrzeugfunktionen und Funktionstests (AP 2.a00+2.b00)

Bei der Auswahl der im Rahmen von Ko-PER realisierten Fahrzeugfunktionen kamen sowohl Top-Down als auch Bottom-Up Betrachtungsweisen zum Einsatz – vgl. das Schema in Abbildung 135. Ausgehend von der Häufigkeitsverteilung aller auftretender Unfalltypen (äußere fliederfarbene Schale) wurde in einer Bottom-Up Betrachtung geprüft, welche zugeordneten Konfliktsituationen durch den Ko-PER Ansatz prinzipiell erfasst werden können (hellblaue Schale). Die entsprechende Teilmenge umfasst immerhin noch ca. 85% aller schweren Unfälle in Deutschland (im Jahr 2010).

Diesen Konfliktsituationen wurden anschließend einer Machbarkeitsanalyse unterworfen, mit dem Ziel, in einer zumindest semiquantitativen Betrachtung abzuleiten, in welchen der Szenarien die auftretenden relevanten Objekte mit den in Ko-PER verwendeten Sensoren und Sensorsignal-Auswertelgorithmen hinreichend genau erfasst werden können (lindgrüne Schale). Zu den so gewonnenen, im Fahrsimulator näher untersuchten Szenarien wurden Funktionen definiert und ausgewählt, deren Komponenten anschließend in Ko-PER Versuchsträgern (Kreuzungen oder Fahrzeugen) implementiert wurden (rote Schale). Eine Untermenge dieser Szenarien/Funktionen wurde schließlich für die Abschlusspräsentation ausgewählt und dort demonstriert (pfirsichfarbener Kern).



Abbildung 135: Sukzessive Eingrenzung der Auswahl der Musterszenarien

Bei der Auswahl der Szenarien bzw. Funktionen der beiden innenliegenden Teilmengen wurden gemäß Abbildung 136 weitere Kriterien herangezogen, nämlich die Erlebbarkeit und subjektive Kundenwertigkeit der Funktion (die Angst der Fahrer vor bestimmten Risikosituationen ist hierfür ein – nicht notwendig objektives – Kriterium), die Relevanz gemäß Unfallstatistik, das Kriterium des Ko-PER Alleinstellungsmerkmals sowie – in Abbildung 136 nicht ausgewiesen – die Kompatibilität mit dem Schauplatz der Ko-FAS Abschlusspräsentation.



Abbildung 136: Qualitative Kriterien bei der Auswahl der Musterszenarien

Die auf kooperativer Perzeption basierenden, für die Abschlusspräsentation letztendlich implementierten, getesteten und dort gezeigten Fahrzeugfunktionen werden in den Folgeabschnitten im Einzelnen beschrieben.

3.8.1 Fahrzeugfunktionen (AP 2.a00)

3.8.1.1 Kreuzen (Testszenario 3-1) und

3.8.1.2 Amerikanisches Abbiegen (Testszenario 4-2)

Für die Situationsanalyse an der öffentlichen Kreuzung Aschaffenburg sind die erzielte Ergebnisse in Abbildung 137 und Abbildung 138 dargestellt.

Abbildung 137 zeigt eine Visualisierung der probabilistischen Spurzuordnung und Bewegungsprädiktion, dargestellt auf der digitalen Karte. Die einzelnen prädizierten Bewegungshypothesen werden im Rahmen der Situationsanalyse mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens gewichtet. Falls sich die prädizierten Trajektorien zweier Fahrzeuge räumlich und zeitlich überlappen, besteht eine potentielle Kollisionsgefahr.



Abbildung 137: Warnung des Systemfahrzeugs (EGO) vor möglichen Kollisionen mit den beiden Objektfahrzeugen (PDO), trotz Sichtverdeckung durch einen Van.

Aus der Überlappung der prädizierten Trajektorien werden die Position der Konfliktbereiche auf der digitalen Karte (siehe Abbildung 137 und Abbildung 138) ermittelt. Für diese Konfliktbereiche werden jeweils der zeitliche Verlauf der Kollisionswahrscheinlichkeit für die prädizierte Bewegungshypothesen (A, B, C) berechnet. Für den Fall einer prädizierten Kollision wird hieraus die TTB (*TimeToBrake*) berechnet (siehe /30/). Abbildung 138 visualisiert den Zeitpunkt der prädizierten Kollision und den aus der Situation abgeleiteten letztmöglichen Bremszeitpunkt zur Vermeidung der Kollision, außerdem den Zeitpunkt der Warnungsausgabe.

Die entsprechende Warnung wird ausgegeben, wenn die Warnungsbedingung einen vorgegebenen Schwellwert übersteigt und der letztmögliche Bremszeitpunkt bei $TTB \leq 2 \text{ sec}$ liegt.

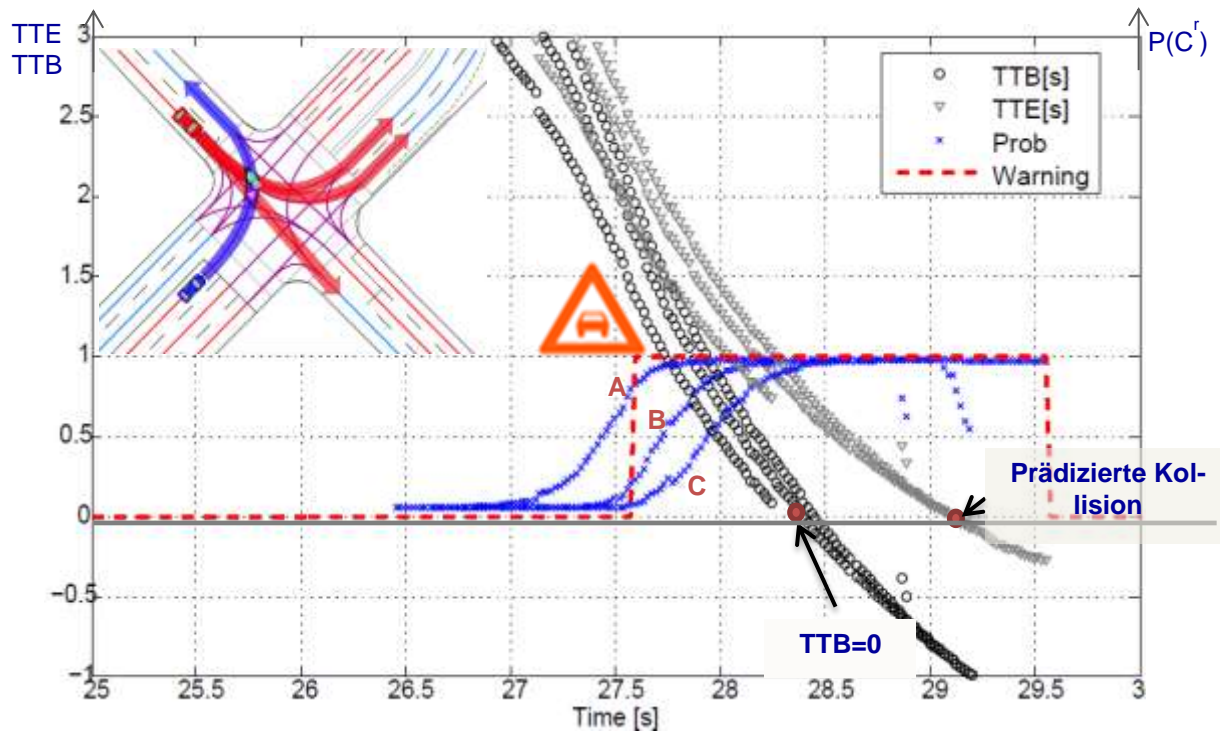


Abbildung 138: Verknüpfung von Situationsanalyse, MMI und Kollisionswahrscheinlichkeit für die rot dargestellten Trajektorien (A,B,C)

Das Ziel der Fahrdemonstrationen war es, das System für den Fahrer erlebbar zu machen. Abbildung 139 und Abbildung 140 zeigen jeweils den Zeitpunkt der Warnungsausgabe, dargestellt als Warndreieck im Display.



Abbildung 139: Szenario 4-2, Kreuzen mit Verdeckung.

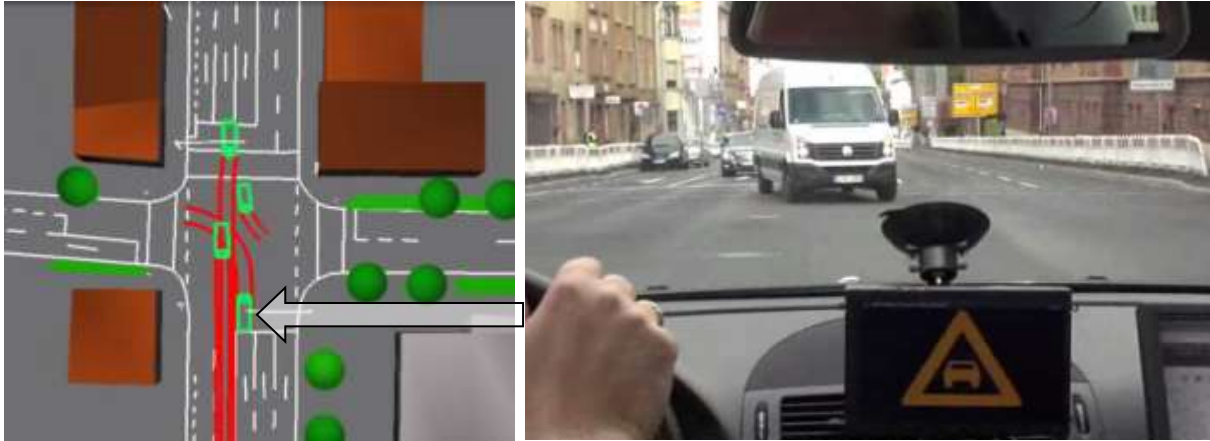


Abbildung 140: Szenario 3-1, Linksabbiegen mit Gegenverkehr und Verdeckung

3.8.1.3 Kooperativer Fußgängerschutz (Testszenario 5-1)

Im Szenario 5-1 wird die Situation behandelt, in der ein Fußgänger im fließenden Verkehr die Fahrbahn überquert. Häufig tritt der Fußgänger zwischen parkenden Fahrzeugen heraus auf den Fahrstreifen. Entsprechend ist der Fußgänger für herannahende Fahrzeuge erst sehr spät zu sehen. In Abbildung 141 ist dargestellt, dass die Sicht des roten Fahrzeugs auf den Fußgänger durch parkende Fahrzeuge verdeckt wird. Im Gegensatz dazu ist die Sicht des grünen Fahrzeugs auf den Fußgänger nicht eingeschränkt.

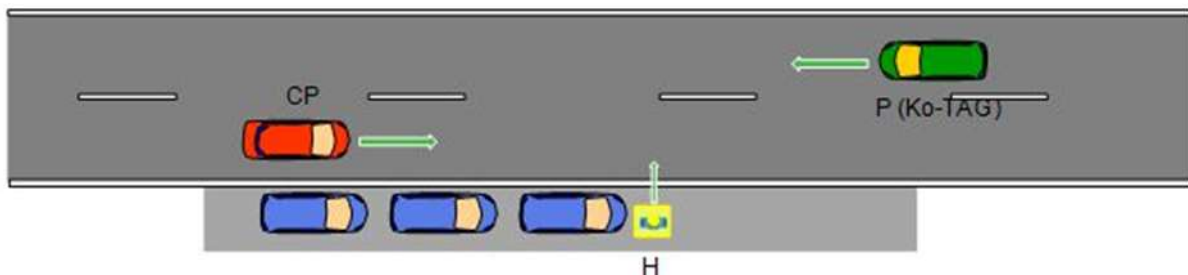


Abbildung 141: Fußgänger mit Ko-TAG Transponder überschreitet Fahrbahn

Zielsetzung der Sicherheitsfunktion ist es, durch einen Informationsaustausch zwischen den beiden Fahrzeugen die Sichtverdeckung des roten Fahrzeugs auf den Fußgänger aufzulösen. Grundlage hierfür ist eine Kombination der Entwicklungsergebnisse aus den Projekten Ko-TAG und Ko-PER. Hierzu erfasst das grüne Fahrzeug die Position und Bewegung des Fußgängers mittels der Ko-TAG Transpondertechnologie. Die entsprechende Information wird in Form einer Objektliste via Funk an das rote Fahrzeug übermittelt. Gemäß dem Ko-PER Ansatz, Abbildung 142, wird sie der kommunikationsbasierten Perzeption zugerechnet und im Rahmen der fahrzeugübergreifenden Fusion mit der Objektliste der fahrzeuglokalen Umfeld-Erfassung fusioniert.

Die resultierende Objektliste wird dem Fahrerassistenzsystem übergeben. Dieses bewertet die vorliegende Situation. Wird dabei erkannt, dass der Fußgänger sehr wahrscheinlich vor dem Fahrzeug auf den Fahrstreifen treten wird, erfolgt ein visueller Hinweis.

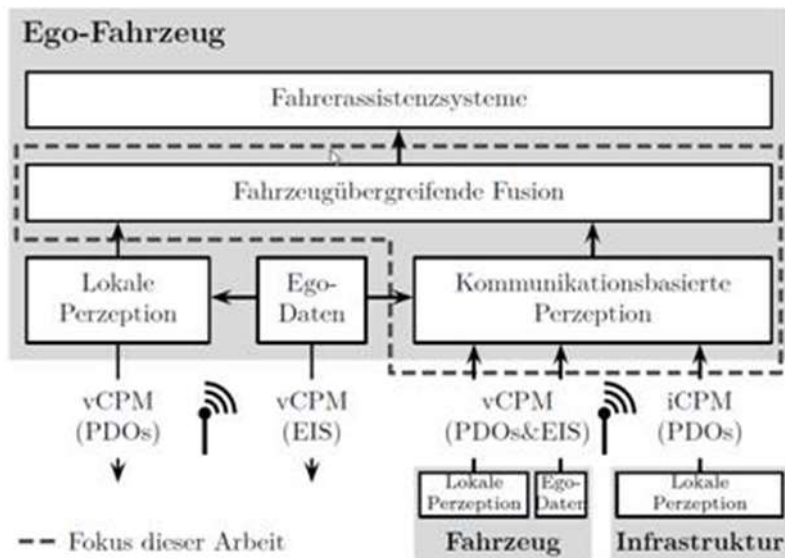


Abbildung 142: Architektur für die fahrzeugübergreifende Perzeption

3.8.1.4 Querender Fußgänger beim Rechtsabbiegen (Testszenario 5-2)

Das Kreuzungs-Szenario „Querender Fußgänger beim Rechtsabbiegen“ weist die Vorteile der Anwendung kooperativer Perzeption für das Tracking und die Absichtserkennung von VRUs (*Vulnerable Road User* = ungeschützter Verkehrsteilnehmer) aus.

Im Szenario der Abbildung 143 nähert sich ein Fahrzeug der Testkreuzung in der Absicht, rechts abzubiegen. Gleichzeitig nähert sich aus der Querstraße kommend ein Fußgänger mit der Absicht, die Querstraße an einem Überweg zu kreuzen. Durch die Randbebauung der Kreuzung ist die Sicht zwischen Fußgänger und Autofahrer bis kurz vor dem hypothetischen Kollisionszeitpunkt verdeckt, was ohne Gegenmaßnahmen zu einer kritischen Situation führt.

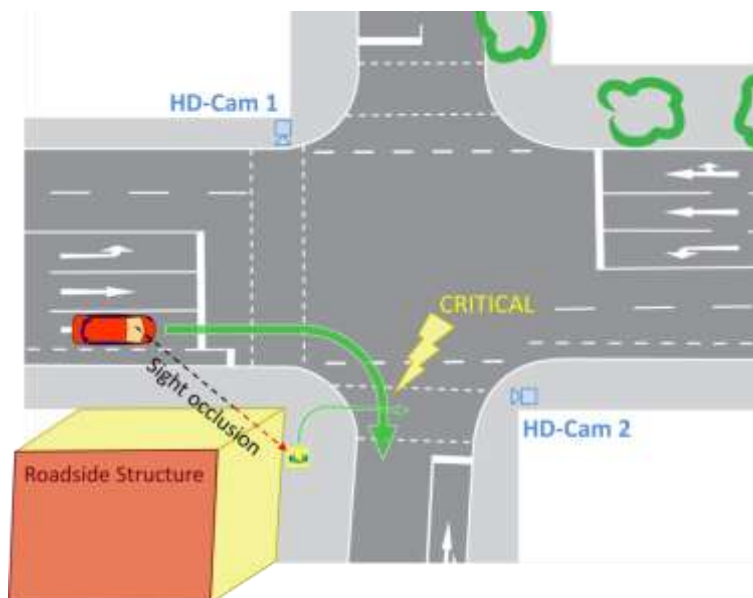


Abbildung 143: Rechtsabbieger bei der Zufahrt auf die Kreuzung. Die Sicht auf den Fußgänger ist durch Radbebauung verdeckt.

In der gezeigten Anwendung dient das Perzeptionssystem der Kreuzung als zusätzlicher Sensor, der einerseits frühzeitig Objektdaten des verdeckten Fußgängers zur Verfügung

stellt und andererseits über die Ko-PER spezifische DEN-Nachricht vom Typ PED eine Früherkennung der Loslaufbewegung samt Fußgänger-Trajektorien-Prädiktion liefert (Siehe Abschnitt 3.3.2.4.6). Diese Information wird im Fahrzeug für eine frühzeitige Gefahrenanalyse eingesetzt. Ziel ist dabei, den Fahrer per MMI 2 bis 3 Sekunden vor der potentiellen Kollision auf den verdeckten Fußgänger hinzuweisen (siehe Abbildung 143) und die Kritikalität der Situation somit deutlich zu mindern.

3.8.1.5 Kreuzender PKW – querender Radfahrer (Testszenario 6-1)

Im Szenario 6-1 überquert ein Fahrradfahrer vor einem Fahrzeug dessen Fahrstreifen. Die Situation ist besonders kritisch, wenn, wie in Abbildung 144 dargestellt, die Sicht zwischen dem rot visualisierten Fahrzeug und dem Radfahrer durch ein Gebäude verdeckt ist.

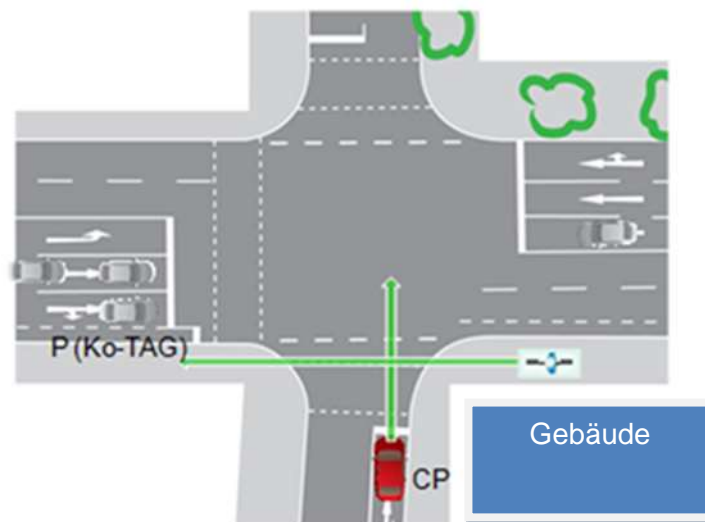


Abbildung 144: Kreuzender PKW mit querendem Radfahrer

Zielsetzung der Entwicklung war es, durch einen Informationsaustausch zwischen dem Ko-TAG Fahrzeug bzw. der Ko-PER Kreuzung und dem roten Fahrzeug die Sichtverdeckung zwischen dem roten Fahrzeug und dem Radfahrer aufzulösen. Grundlage hierfür ist die Kombination der Entwicklungsergebnisse aus den Projekten Ko-TAG und Ko-PER. Das Ko-TAG Fahrzeug erfasst die Position und die Bewegung des Radfahrers und stellt diese Daten in Form einer Objektliste dem roten Fahrzeug per Funk zur Verfügung. Alternativ bzw. zusätzlich liefert die im Rahmen von Ko-PER entwickelte Kreuzungsperzeption die Position und Bewegung des Radfahrers und stellt sie dem roten Fahrzeug in Form einer Objektliste zur Verfügung.

3.8.1.6 Linksabbiegender PKW – querender VRU (Testszenario 6-3)

In Szenario 6-3 kreuzt ein Fahrradfahrer vor einem Fahrzeug, welches links abzubiegen beabsichtigt, dessen Fahrspur. Diese Situation wird dadurch verschärft, dass die Sicht auf den Radfahrer durch parkende Fahrzeuge verdeckt wird – vgl. Abbildung 145. Durch den entgegenkommenden Verkehr ist die Aufmerksamkeit des Fahrers im roten Fahrzeug zusätzlich beansprucht.

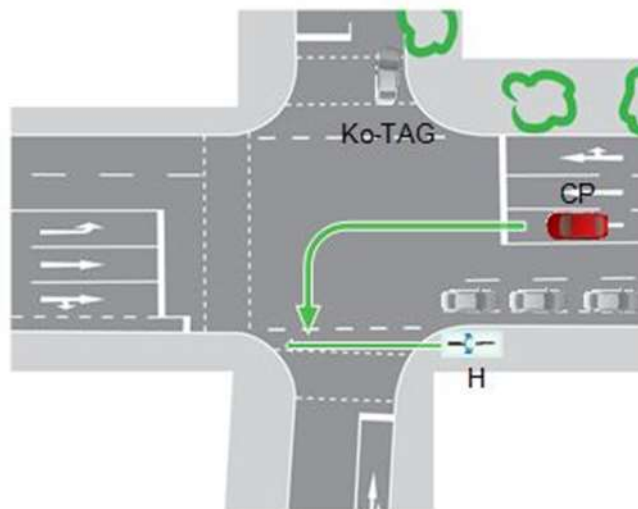


Abbildung 145: Linksabbiegender PKW mit querendem Radfahrer

Auch in dieser Situation ist es das Ziel, durch einen Informationsaustausch zwischen der Ko-OPER Kreuzungsperzeption und dem roten Fahrzeug die Sichtverdeckung zwischen dem roten Fahrzeug und dem Radfahrer aufzulösen. Grundlage hierfür ist die Erfassung der Position und Bewegung des Radfahrers durch das Sensornetzwerk der Kreuzung. Die entsprechenden Informationen werden in Form einer Objektliste per Funk an das rote Fahrzeug übermittelt.

3.8.2 Funktionstests (AP 2.b00)

3.8.2.1 Aufgabenstellung, Zielsetzungen und Ergebnisse / Alleinstellungsmerkmale

Aufgabe der Funktionstests war es, die in den Fahrzeugen implementierten Assistenzsysteme im Systemverbund mit der Infrastruktur und den Perzeptionsfahrzeugen zu erproben. Dabei werden Informationen über das Umfeld in Echtzeit ausgetauscht; das Systemverhalten kann zeitlich und räumlich in realer Umgebung studiert werden. Zusätzlich werden die Perzeptionsergebnisse aber auch mit Zeitstempeln und Referenzpositionen versehen und bei den jeweiligen Systempartnern lokal gespeichert. Damit kann das zeitliche Systemverhalten beliebig offline nachvollzogen es können beispielsweise die Totzeiten in der Echtzeitübertragung ermittelt werden.

Nach einer ganzen Reihe von Testkampagnen mit den Zielen die Perzeption von Infrastruktur und Fahrzeugen, die Lokalisierung, die Kommunikation und die Situationsanalyse zu erproben, wurde im AP 2.b00 die eigentliche Assistenzfunktion im Fahrzeug getestet. Hierfür wurden die Kreuzungs- und Längsszenarien der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Funktion und die zugeordneten Fahrzeugen ausgewählt. Viele der im öffentlichen Verkehr absolvierten Fahrversuche mussten aus Sicherheitsgründen nachts durchgeführt werden.

Die Durchführung von Funktionstest war ursprünglich auch an der Testkreuzung Alzenau vorgesehen. Da aber beim Testen der Fahrzeugfunktionen eine zuverlässige Eigenlokalisierung, bzw. zusätzliche Referenzpositionsmessungen, einen unverzichtbaren Bestandteil des Testinhalts darstellen, konnten die ausgewählten Szenarien nicht in Alzenau gefahren werden. Bedingt durch die im Vergleich zur Musterkreuzung Aschaffenburg engeren Straßen und die Satellitenabschattung durch hohe Bäume am Fahrbahnrand, war dort ein nur mangelhafter GNSS-Empfang verfügbar, der eine zuverlässige Eigenlokalisierung auch auf Basis der Referenzsysteme vereitelte.

Die Zielsetzungen und Ergebnisse der Fahrzeugfunktionstests sind den realisierten Einzel-funktionen entsprechend gegliedert und werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.8.2.2 Linksabbiegen mit verdecktem Gegenverkehr (Szenario 3-1)

Im Szenario Linksabbiegen mit Gegenverkehr (amerikanisches Abbiegen) möchte der Fahrer des Eigenfahrzeugs (rot) links in eine Seitenstraße abbiegen, siehe Abbildung 146. Der vorfahrtsberechtigten Gegenverkehr ist durch einen Van (weiß) verdeckt.

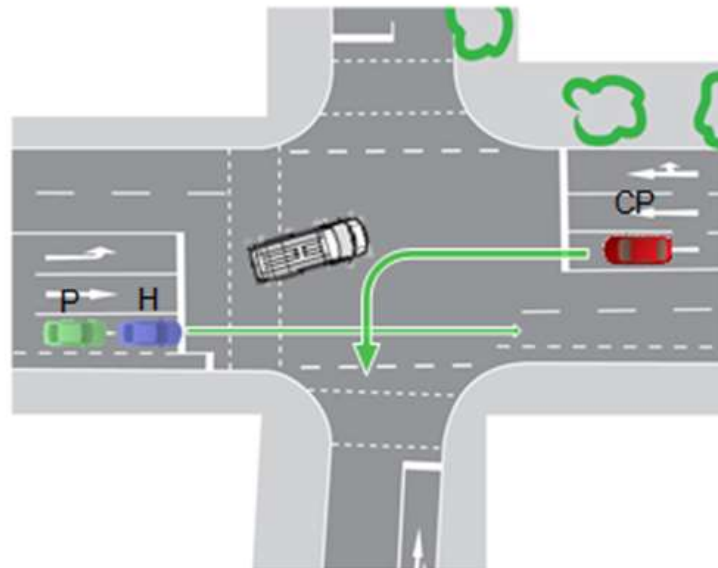


Abbildung 146: Linksabbieger (rot) bei verdecktem Gegenverkehr (blau)

Zielsetzung der Entwicklung ist es, dem Fahrer des Eigenfahrzeuges eine frühzeitige Warnung zu dem vom IZVW ermittelten optimalen Warnzeitpunkt 2s vor dem letztmöglichen Bremszeitpunkt darzubieten.

Der zugehörige Test zur Überprüfung des korrekten Warnzeitpunktes ist identisch zu Szenario 4-2 das im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird. Da die Auswertung gemeinsam erfolgte, werden der Test und die zugehörigen Ergebnisse in Abschnitt 3.8.2.3 beschrieben und erläutert.

3.8.2.3 Kreuzen mit Sichtverdeckung (Szenario 4-2)

Im Szenario „Kreuzen mit Sichtverdeckung“ möchte der Fahrer des Eigenfahrzeugs (rot) eine Kreuzung queren, siehe Abbildung 147. Die Sicht auf den vorfahrtsberechtigten Querverkehr ist durch die Bebauung und einen Van (weiß) verdeckt.

Zielsetzung der Entwicklung ist analog zu Szenario 3-1, dem Fahrer des Eigenfahrzeuges eine frühzeitige Warnung zu dem vom IZVW als optimal ermittelten Warnzeitpunkt 2s vor dem letztmöglichen Bremszeitpunkt darzubieten.

Gegenstand der durchgeführten Tests war die Überprüfung der realisierten Warnzeiten. Als „Ground Truth“ für die Evaluierung wurden exemplarische Dynamikdaten aus der Fahrsimulation des IZVW für beide Szenarien ausgewertet. In Abbildung 148 und Tabelle 18 sind die Ergebnisse dargestellt.

Abbildung 148 zeigt die Geschwindigkeit des Eigenfahrzeuges über dem Abstand des Eigenfahrzeugs zum Konfliktpunkt. Der Konfliktpunkt wurde für einen Vergleich zwischen den Simulatordaten und den Realdaten durch den Schnittpunkt der Trajektorien von Eigenfahrzeug und Konfliktpartner bei den Simulatordaten und durch den Schnittpunkt der Centerlines der Routen von Eigenfahrzeug und Konfliktpartner aus der digitalen Karte approximiert. Die Vorgehensweise ist durch die Tatsache motiviert, dass in den untersuchten Szenarien sowohl im Simulator als auch den erhobenen Messdaten das Eigenfahrzeug sich zum optimalen Warnzeitpunkt mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Damit ist der Ort der Warnung in einer

mulators liegen. Für die Berechnung der TTB zur Auslösung der Warnung bei detektierter Kritikalität der Situation wurde eine Verzögerung von 4s angenommen.

Die Ergebnisse für das Szenario „Kreuzen mit Sichtverdeckung“ liegen unterhalb der 3s-Grenze. Ursache ist die zeitliche Synchronität der Testfahrzeuge. Erreicht das Eigenfahrzeug den Konfliktpunkt rechnerisch ausreichend früher als der Konfliktpartner, so ist die Kritikalitätsbedingung zum optimalen Warnzeitpunkt nicht erfüllt. Durch Einleiten eines Bremsvorganges erhöht sich die TTB des Eigenfahrzeuges und die Kritikalität ist damit bei einer TTB zum Konfliktpunkt kleiner 2s gegeben. Im Rahmen der Fahrversuche ist diese „Verkürzung“ der Warnzeit nicht negativ aufgefallen. Spielraum zur Optimierung in der Situationsanalyse ist durch eine erweiterte Modellierung gegeben.

Scenario	Mean t	Variance t	Number of warnings
KAB - Kreuzen	-2.51 s	0.07 s	7
KAB - amerikanisches Abbiegen	-3.19 s	0.12 s	21
KUL - Kreuzen	-2.15 s	0.34 s	5
Simulator - Kreuzen	-3.06 s	0.00 s	5
Simulator - amerikanisches Abbiegen	-2.93 s	0.01 s	5

Tabelle 18: Realisierte Warnzeiten (TTC) in den Szenarien 3.1 und 4.2

Ergänzend zur Auswertung der Warnzeiten wurde der Realverkehr an der KAB betrachtet um die Sensitivität der Situationsanalyse in Bezug auf Falschwarnungen im Normalverkehr zu beurteilen. Abbildung 149 zeigt, dass sich der Normalverkehr bei Annäherung an die Stopplinie der Linksabbiegerspur der KAB unterhalb der 3s-Grenze bewegt. Das Risiko einer Falschwarnung ist damit bei der gegebenen Kreuzungstopologie gering.

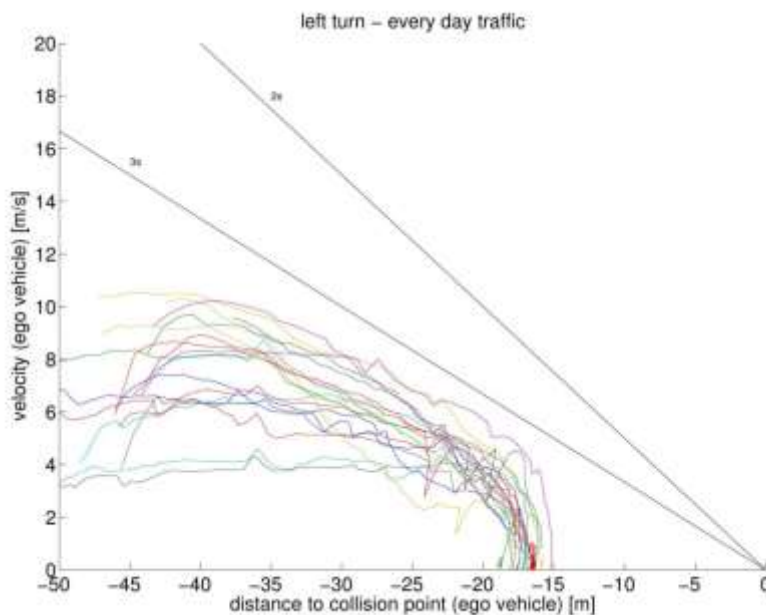


Abbildung 149: Bremsvorgänge des Realverkehrs an der für Szenario 3.1 genutzten Linksabbiegespur der KAB

3.8.2.4 Fußgänger überschreitet Fahrbahn (Szenario 5-1)

In Abbildung 150 ist das Szenario „Fußgänger überschreitet Fahrbahn“ dargestellt. Die Position des Fußgängers wird vom blauen Fahrzeug mittels Ko-TAG Technologie bestimmt und via Funk an das orangefarbene Ko-PER Fahrzeug übermittelt. Durch diesen Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen wird die Sichtverdeckung des Perceptionssystems im orangefarbenen dargestellten Fahrzeug aufgelöst.



Abbildung 150: Fußgänger überschreitet Fahrbahn

Der Test dieses Systems erfolgte im Rahmen von zwei Messkampagnen auf einer Zufahrt an die Aschaffener Versuchskreuzung. Hierbei wurde in über 30 Testfällen gezeigt, dass für das orangefarbene Fahrzeug die Sichtverdeckung mittels kooperativer Perception bereits mehr als 3 Sekunden vor Erreichen des Fußgängers überwunden wird und somit ein entsprechender Hinweis für den Fahrer generiert werden kann.

3.8.2.5 Querender Fußgänger beim Rechtsabbiegen (Szenario 5-2)

Im Testplan sind unter Gliederungspunkt 3.3.3 „Rechtsabbiegender PKW – querender Fußgänger“ die durchgeführten Tests zur Entwicklung der Funktion zu finden. In der folgenden Abbildung 151 ist das auch auf der Abschlusspräsentation gezeigte Szenario visualisiert.

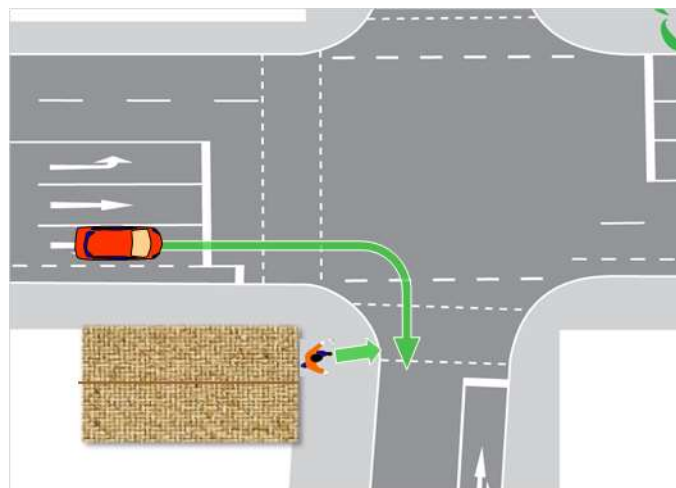


Abbildung 151: Querender Fußgänger an Kreuzung

3.8.2.5.1 Funktionsbeschreibung:

Das Egofahrzeug fährt auf eine Kreuzung zu und möchte rechts abbiegen. Gleichzeitig beginnt ein Fußgänger den Kreuzungsast, in den das Fahrzeug einbiegen möchte, zu überqueren (Abbildung 151). Der Fahrer kann den Fußgänger noch nicht erkennen, müsste aber bereits seine Geschwindigkeit reduzieren, um noch komfortabel vor dem querenden Fußgänger anhalten zu können.

Hier wird nun der Fahrer mit einem akustischen und visuellen Hinweis (Abbildung 152) unterstützt, so dass er frühzeitig reagieren kann. Die Entstehung einer gefährlichen Situation wird dadurch schon im Ansatz vermieden.



Abbildung 152: Hinweis beim Rechtsabbiegen

Die Information über den querenden Fußgänger wird von der Infrastruktur per Funk (ITS G5) bereitgestellt (Abbildung 153). Die Infrastruktur liefert bereits dann eine entsprechende Meldung mit Angabe der Laufrichtung (iDEN/PED), wenn der Fußgänger sich noch im Loslaufvorgang befindet (Absichtserkennung). Zusammen mit der Eigenposition des Fahrzeugs und der ebenfalls per Funk übertragenen Position des Fußgängers wird unter Zuhilfenahme von weiteren Daten wie der Fahrzeugtrajektorie und der Fahrerabsicht (Blinker) das Kollisionsrisiko im Fahrzeug abgeschätzt. Zu einem definierten Zeitpunkt erfolgt dann der entsprechende Hinweis an den Fahrer.

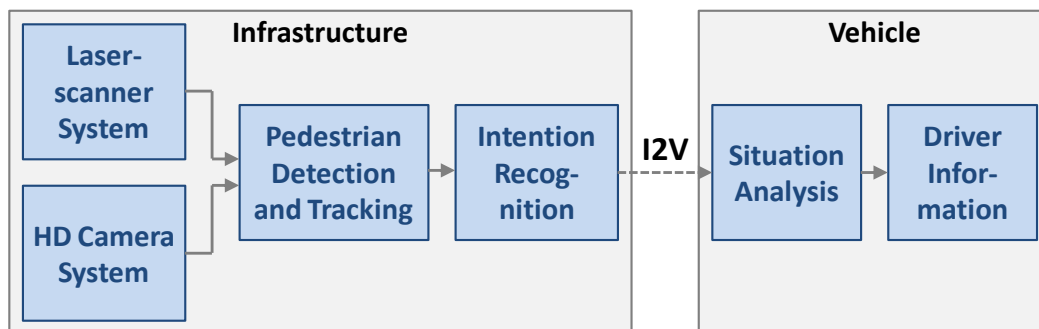


Abbildung 153: Informationsfluss Infrastruktur zu Fahrzeug

3.8.2.5.2 Testergebnis:

In den durchgeführten Testfahrten ergaben sich die folgenden Ergebnisse:

- Ein signifikanter Sicherheitsgewinn aufgrund der Fußgänger-Absichtserkennung und der frühzeitigen Fahrerinformation noch vor der Sichtbarkeit des Fußgängers war deutlich erkennbar.
- Eine Fusion der per Funk übertragenen Daten mit der fahrzeugeigenen Perzeption (Radar) konnte wegen des fehlenden Erfassungsbereichs bzw. der Verdeckung in diesem Szenario keine Verbesserung der Situationsanalyse bewirken.
- Die Relativposition und -orientierung des Fahrzeugs zum Fußgänger konnte trotz der Verwendung einer hochgenauen Inertialsensorik-gestützten DGPS-Plattform nicht sehr zuverlässig bestimmt werden, was mit dem Ansatz des *Advisory Warnings* allerdings gut verträglich war..

3.8.2.6 Kreuzender PKW – querender Radfahrer (Szenario 6-1)

In Abbildung 154 ist das Szenario „Querender Radfahrer“ dargestellt. Die Position des Radfahrers wird entweder vom blauen Fahrzeug mittels Ko-TAG Technologie oder von der Kreuzungsperzeption mittels Laserscanner bestimmt und per Funk an das orangefarben dargestellte Ko-PER Fahrzeug übermittelt. Durch den Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen bzw. die Informationsbereitstellung durch die Infrastruktur wird die Sichtverdeckung des Perzeptionssystems im orangen Fahrzeug aufgelöst.



Abbildung 154: Querender Radfahrer.

Der Test des Systems erfolgte im Rahmen von zwei Messkampagnen an der Aschaffener Kreuzung. Hierbei wurde in über 30 Testfällen gezeigt, dass für das orangefarbene Fahrzeug die Sichtverdeckung mittels kooperativer Perzeption bereits mehr als 3 Sekunden vor dem Erreichen der Haltelinie überwunden wird und folglich eine entsprechende Fahrerwarnung ausgegeben werden kann.,

3.8.2.7 Linksabbiegender PKW – querender VRU (Szenario 6-3)

In Abbildung 155 ist das Szenario „Querender Radfahrer beim Linksabbiegen“ dargestellt.



Abbildung 155: Querender Radfahrer beim Linksabbiegen.

Die Position des Radfahrers wird von den Laserscannern der Kreuzung bestimmt und via Funk an das orangefarbene Ko-PER Fahrzeug übermittelt. Durch diesen Informationsaustausch zwischen der Infrastruktur und dem Ko-PER Fahrzeug wird die Sichtverdeckung des Perzeptionssystems im orangefarbenen Fahrzeug aufgelöst.

Der Test dieses Systems erfolgte im Rahmen von zwei Messkampagnen an der Aschaffenburger Kreuzung. Auch für dieses Szenario wurde in über 30 Testfällen gezeigt, dass für das orangefarben dargestellte Fahrzeugs die Sichtverdeckung bereits mehr als drei Sekunden vor Erreichen der Haltelinie aufgelöst wird, woraufhin auch in diesem Szenario ein zeitgerechter Hinweis an den Fahrer gegeben werden kann.

3.9 In Kapitel 3 referenzierte Literatur

- /1/ M. Goldhammer, E. Strigel, D. Meißner, U. Brunsmann, K. Doll, K. Dietmayer: Cooperative Multi Sensor Network for Traffic Safety Applications at Intersections, 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2012), Anchorage, Alaska, USA, pp. 1178-1183, 2012
- /2/ D. Weimer, S. Köhler, C. Hellert, K. Doll, U. Brunsmann, R. Krzikalla: GPU Architecture for Stationary Multi-sensor Pedestrian Detection at Smart Intersections, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'11), Baden-Baden, pp 89-94, 2011
- /3/ S. Köhler, M. Goldhammer, S. Bauer, K. Doll, U. Brunsmann, K. Dietmayer: Early Detection of the Pedestrian's Intention to Cross the Street, 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2012), Anchorage, Alaska, USA, pp. 1759-1764, 2012
- /4/ S. Köhler, M. Goldhammer, S. Bauer, S. Zecha, K. Doll, U. Brunsmann, K. Dietmayer: Stationary Detection of the Pedestrian's Intention at Intersections, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 5, pp.87-99, 2013, Invited Paper
- /5/ M. Goldhammer, M. Gerhard, S. Zernetsch, K. Doll, U. Brunsmann: Early Prediction of a Pedestrian's Trajectory at Intersections, 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), Den Haag, Holland, pp. 237-242, 2013
- /6/ F. Saxen, K. Doll, U. Brunsmann: Support Vector Pruning with SortedVotes for Large-Scale Datasets, IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS 2011), Guangzhou, China, pp. 305-309, 2011.
- /7/ S. Bauer, S. Schlotterbeck-Macht, U. Brunsmann: FPGA Implementation of a HOG-based Pedestrian Recognition System, 42. MPC-Workshop, Karlsruhe, pp. 49-58, 2009
- /8/ S. Bauer, S. Köhler, K. Doll, U. Brunsmann: FPGA-GPU Architecture for Kernel SVM Pedestrian Detection; IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), San Francisco, USA, pp. 61-68, 2010
- /9/ M. Berberich, K. Doll: Highly Flexible FPGA-Architecture of a Support Vector Machine, 45. MPC-Workshop, Albstadt-Sigmaringen, 2011
- /10/ J. Kempf, M. Schmitt, S. Bauer, U. Brunsmann, K. Doll: Real-Time Processing of High-Resolution Image Streams using a Flexible FPGA Platform, Proceedings of the Embedded World Conference, Nürnberg, 2012
- /11/ M. Hahnle, M. Hisung, F. Saxen, U. Brunsmann, K. Doll: FPGA-based Real-Time Pedestrian Detection on High Resolution Images, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), EVW, Portland, USA, pp. 629-635, 2013; Best Paper Award
- /12/ Daniel Meißner und Klaus Dietmayer. Simulation and Calibration of Infrastructure based Laser Scanner Networks at Intersections. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2010), 2010
- /13/ Daniel Meißner, Stephan Reuter und Klaus Dietmayer. Multi-Model-PHD-Filter zur Verfolgung von Verkehrsteilnehmern an Kreuzungen mit Laserscannern. 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS 2012, Seite(n) 57 - 66, 2012

- /14/ Daniel Meißner, Stephan Reuter, Benjamin Wilking und Klaus Dietmayer. Road User Tracking Using a Dempster-Shafer Based Classifying Multiple-Model PHD Filter. Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion, 2013.
- /15/ Daniel Meißner, Stephan Reuter und Klaus Dietmayer. Real-Time Detection and Tracking of Pedestrians at Intersections Using a Network of Laserscanners. Intelligent Vehicles Symposium (IV), Seite(n) 630 -635, 2012
- /16/ M. Gabb, O. Löhlein, R. Wagner, A. Westenberger, M. Fritzsche, and K. Dietmayer, "High-performance on-road vehicle detection in monocular images," in Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2013
- /17/ C2C-CC White Paper on Network Design Limits and VANET Performance, 2009, <http://www.car-2-car.org>
- /18/ SAFESPOT public deliverable D3.5.4; http://www.safespot-eu.org/documents/SF_D3.5.4_KeyConceptsAndExploitation_v1.2.pdf
- /19/ Ko-PER Internet-Auftritt unter www.kofas.de: hiervon die
- Videos der Szenarien Kreuzen und Linksabbiegen mit Gegenverkehr
 - Spezifikation der Ko-PER spezifischen Nachrichteninhalte – siehe [58]
 - Vortragsfolien der Ko-FAS-Abschlussdemonstration zur fahrzeugübergreifenden Informationsfusion
- /20/ A. Rauch, F. Klanner, K. Dietmayer, "Analysis of V2X Communication Parameters for the Development of a Fusion Architecture for Cooperative Perception Systems", in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp. (IV), 2011, S. 685-690
- /21/ Statistisches Bundesamt, „Unfallentwicklung auf Deutschen Straßen 2012“, 2013, www.destatis.de.
- /22/ M. Liebner, M. Baumann, F. Klanner, and C. Stiller, "Driver intent inference at urban intersections using the intelligent driver model," in IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Alcalá de Henares, Spain, June 2012, pp. 1162–1167; Best Paper Award
- /23/ M. Liebner, F. Klanner, and C. Stiller, "Der Fahrer im Mittelpunkt – Eye-Tracking als Schlüssel zum mitdenkenden Fahrzeug?" in 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme Walting, 2012, pp. 87–96
- /24/ M. Liebner, F. Klanner, M. Baumann, C. Ruhhammer, and C. Stiller, "Velocity-based driver intent inference at urban intersections in the presence of preceding vehicles," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, May 2013
- /25/ M. Liebner, C. Ruhhammer, F. Klanner, and C. Stiller, "Generic Driver Intent Inference based on Parametric Models," IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, The Hague, The Netherlands, Oct. 2013
- /26/ G. Weidl und G. Breuel, „Overall Probabilistic Framework for Modeling and Analysis of Intersection Situations,“ in Proceedings of the 16th Int. Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, Springer, 2012, pp. 257-268
- /27/ D. Petrich, T. Dang, D. Kasper, G. Breuel und C. Stiller, „Map-based Long Term Motion Prediction for Vehicles in Traffic Environments,“ in Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, The Hague, 2013, pp. 2166-2172
- /28/ G. Weidl, V. Singhal, D. Petrich, D. Kasper, A. Wedel und G. Breuel, „Collision Risk Prediction and Warning at Road Intersections using an Object Oriented Bayesian Network,“ in Proceedings of 5th International Conference Automotive, Eindhoven, 2013, pp. 270-277
- /29/ F. Naujoks, H. Grattenthaler und A. Neukum, „Auswirkungen von Spezifität und Zeitpunkt früher Fahrerinformationen zur Kollisionsvermeidung in urbanen Szenarien,“ in 55. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Wien, 2013
- /30/ A. Tamke, T. Dang und G. Breuel, „A flexible method for criticality assessment in driver assistance systems,“ in IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Baden-Baden, 2011, pp. 680-702

4 Wichtigste Ereignisse

4.1 Partnerkreistreffen Kleinheubach, Zwischen- & Schlusspräsentation

4.1.1 Ko-PER Beiträge zum Partnerkreistreffen Kleinheubach

Begleitend zur Forschungsinitiative Ko-FAS sollten Unternehmen und Vertretern weiterer Gruppen in einem Öffnungsprozess die Möglichkeit gegeben werden, Einblick in die Fortschritte des Vorhabens zu erhalten und die weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu begleiten. Den ersten Schritt dieses Öffnungsprozesses stellte das Partnerkreistreffen am 14. und 15. Oktober 2010 in Kleinheubach dar.



Durch dieses Treffen wurden der gegenseitige Austausch und die Vernetzung zwischen und in den drei Verbundprojekten der Forschungsinitiative Ko-FAS angeregt, sowie wertvolle Impulse von projektexternen Experten erschlossen. Das Programm der beiden Tage zeigen die beiden nachstehenden Tabellen:

Donnerstag, 14. Oktober 2010		<i>Raum: Marmorsaal</i>
Kennenlernen und Informationsaustausch innerhalb Ko-FAS		
ab 09:00 Uhr	Zeitfenster für Vorgespräche nach individueller Planung	
11:00 Uhr + 15min	Begrüßung des Hausherrn <i>Alois Konstantin Fürst zu Löwenstein</i>	
11:15 Uhr + 15min	Begrüßung durch den Fördergeber <i>Matthias Erdmann, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie</i>	
11:30 Uhr + 30min	Ziele und Positionierung der Forschungsinitiative Ko-FAS <i>Stephan Zecha (Ko-FAS Koordinator), Continental Safety Engineering International GmbH</i>	
Vorstellung und aktueller Stand der drei Verbundprojekte		
12:00 Uhr + 30min	Ko-TAG – Fahrzeugsicherheit durch kooperative Sensortechnologien <i>Dr. Daniel Schwarz (Ko-TAG Projektsprecher), BMW Group Forschung und Technik</i>	
12:30 Uhr + 30min	Ko-PER – Fahrerassistenz und präventive Sicherheit mittels kooperativer Perzeption <i>Dr. Reiner Wertheimer (Ko-PER Projektsprecher), BMW Group Forschung und Technik</i>	
13:00 Uhr + 60min	Mittagessen	<i>Raum: Pompejanischer Saal</i>
14:00 Uhr + 30min	Ko-KOMP – Komponenten, Werkzeuge und Methoden für kooperative Sicherheit im Straßenverkehr <i>Nikolaus Dellantoni, MAGNA Electronics Europe GmbH</i>	
14:30 Uhr + 90min (ca. 8min je Partner)	Kurzvorstellung der Projektmitarbeiter und Teilprojekthinhalte Pro Verbundprojekt stellen sich alle anwesenden Mitarbeiter eines Projektpartners vor (ca. 3min). Der Teilprojektleiter stellt abschließend die Kompetenzen und Aufgaben des jeweiligen Projektpartners innerhalb des jeweiligen Verbundprojekts vor (ca. 5min, Folien bitte vorab an ZENTEC, Vorlage	

	siehe PP: https://service.projectplace.com/pp/pp.cgi/r525180286). Anschließend folgt das Team des in alphabetischer Reihenfolge nächsten Projektpartners. Sind alle Projektpartnerteams eines Verbundprojekts vorgestellt, folgt das nächste Verbundprojekt.	
	1 Ko-TAG 1.1 BMW 1.2 CSEI 1.3 DAI	2 Ko-KOMP 2.1 ACTS 2.2 CSEI 2.3 HHI 2.4 MEEU
16:00 Uhr + 30min	Kaffeepause	<i>Raum: Pompejanischer Saal</i>
16:30 Uhr + 90min (ca. 8min je Partner)	Kurzvorstellung der Ko-PER Projektmitarbeiter und Teilprojekthinhalte 3 Ko-PER 3.1 BMW 3.2 CONTI 3.3 CSEI 3.4 DAI	3.5 DELPHI 3.6 FORWISS 3.7 HSA 3.8 ITE 3.9 IZVW 3.10 MRM 3.11 SICK
18:00 Uhr +60min	Technikdemos (Moving Target Device & Fahrroboter / Ko-TAG-Versuchsträger / Magna-Versuchsträger)	
19:00 Uhr	Gemeinsames Abendessen	<i>Raum: Restaurant</i>

Freitag, 15. Oktober 2010, 9:00 bis 15:00 Uhr *Raum: Marmorsaal*
Impulsvorträge von externen Experten zu relevanten Themenfeldern
 (jeweils 25min Vortrag und 20min Diskussion)



Abbildung 156: Die Teilnehmer des Partnerkreistreffens der Forschungsinitiative Ko-FAS am 14. und 15. Oktober 2010 in Kleinheubach

4.1.2 Ko-PER Beiträge zur Ko-FAS Zwischenpräsentation

Am 28. und 29. September 2011 fand die Zwischenpräsentation der Forschungsinitiative Ko-FAS in Aschaffenburg und Alzenau statt. Im Rahmen dieser zweitägigen Veranstaltung wurde in Fachvorträgen und Fahrdemonstrationen gezeigt, wie kooperative Sensortechnologien für eine lückenlose Umfeld-Erfassung und ein kooperatives Zusammenwirken von Fahrzeugen sowie die zuverlässige Eigenlokalisierung – auch in urbanen Umgebungen – zur Steigerung der Verkehrssicherheit in der Praxis eingesetzt werden können. Knapp 200 Teilnehmer aus der Fachszene waren dazu an den Bayerischen Untermain gekommen.

Am 28. September 2011 präsentierten die Ko-PER-Partner die erreichten Zwischenergebnisse dem Fachpublikum zunächst anhand eines Übersichtsvortrags sowie sechs Fachvorträgen zu den Schwerpunkten der Projektarbeit. Dabei gaben sie auch einen Ausblick auf die Aktivitäten der zweiten Projekthälfte sowie die Ziele, die bis zum Ende der Projektlaufzeit zu erreichen waren.



Abbildung 157: Bilder vom Ko-PER Auftritt bei der Ko-FAS Zwischenpräsentation

Am 29. September 2011 wurden die erreichten Zwischenergebnisse dann mittels Fahrdemonstrationen und Präsentationen im *Continental Safety Park* in Alzenau aufgezeigt. Nach einführenden Worten durch Matthias Erdmann (Referent im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) sowie Stephan Zecha (Koordinator der Forschungsinitiative Ko-FAS, Continental Safety Engineering International GmbH) bot Ko-PER durch Mitfahrt in den

Versuchsträgern sowie dem Besuch des Technologiepavillons die Möglichkeit, die Potenziale kooperativer Perzeption in der Praxis zu erleben.

4.1.3 Ko-PER Beiträge zur Ko-FAS Abschlusspräsentation

Am 18. und 19. September 2013 fand die Abschlusspräsentation der Forschungsinitiative Ko-FAS in Aschaffenburg statt. Am ersten Tag präsentierten die Projektpartner mittels Fachvorträgen im Schloss Johannisburg die Ergebnisse des Projekts. In den Ko-FAS Plenarsessions wurden dabei die Zielsetzung und Ergebnisse des Verbundprojekts Ko-PER präsentiert. Die Entwicklungshighlights aus Ko-PER wurden in 16 ausgewählten Fachreferaten, die zu vier Fachvortragssitzungen zusammengefasst wurden, vorgestellt.

Mit Fahrdemonstrationen, Bildschirm- und Poster-Präsentationen sowie dem Fahrsimulator wurden den Gästen am zweiten Tag im Umfeld der Versuchskreuzung an der Hochschule Aschaffenburg ausgewählte Entwicklungsergebnisse präsentiert. Das Ko-PER Team trug dabei mit sechs Versuchsträgern, 34 Postern sowie elf Bildschirmpräsentationen zur Abschlusspräsentation bei. Zusätzlich wurden die Entwicklungsergebnisse zur infrastrukturbasierten Perzeption live an der Versuchskreuzung vorgestellt.



Abbildung 158: Bilder vom Ko-PER Auftritt bei der Ko-FAS Schlusspräsentation

4.2 Gastvorträge bei Ko-PER Konsortialtreffen

Zur Diversifikation und Bereicherung des fachlichen Austauschs und zur besseren Vernetzung insbesondere der jüngeren Ko-PER Projektdurchführenden mit der nationalen Fachwelt wurde, beginnend mit dem Jahr 2012, zu jedem Ko-PER Konsortialtreffen ein Gastvortragender eingeladen. Die eingeladenen Gastredner und die Titel der von ihnen gehaltenen Vorträge bei den einzelnen Ko-PER Konsortialtreffen lauten (siehe Folgeseite):

Ko-PER Konsortialtreffen Q-I/12 am 16.02.2012 in Aschaffenburg

Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Vortrag zum Thema: „Hochautomatisiertes Fahren Grundstein für die nächste Generation von Fahrerassistenzsystemen“

Ko-PER Konsortialtreffen Q-II/12 am 09.05.2012 in Aschaffenburg

Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU Darmstadt;
Vortrag zum Thema: „Methoden zur objektiven Bewertung von Fahrerassistenzsystemen“

Ko-PER Konsortialtreffen Q-III/12 am 11.07.2012, Umweltforschungsstation Schneeferner

Mark Schulte, Continental Safety Engineering International GmbH, und Henrik Liers, Verkehrsunfallforschung Dresden; Vortrag zum Thema: „Nutzwertbetrachtung in Ko-KOMP“

Ko-PER Konsortialtreffen Q-I/13 am 07.02.2012 in Herrenberg

Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Vortrag zum Thema: „Von kognitiven Automobilen zu kooperativem Verkehr“

Ko-PER Konsortialtreffen Q-II/13 am 07.02.2012 auf der Reisensburg / Günzburg

Prof. Dr.-Ing. Werner von Seelen, Emeritus des Lehrstuhls für Theoretische Biologie, Ruhr Universität Bochum; Vortrag zum Thema: „Zur Autonomie von Systemen“

Ko-PER Konsortialtreffen Q-III/13 am 11.07.2013 in Herrsching am Ammersee

Prof. Dr. phil. Klaus Bengler, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München;
Vortrag zum Thema: „Wer fährt hier? Ergonomische Aspekte der zukünftigen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion“

4.3 Mess- und Testkampagnen

Eine Übersicht zu den im Ko-PER Projektverlauf durchgeführten, partnerübergreifenden Mess- und Testkampagnen gibt die folgende Tabelle 19.

#	Datum	Inhalt / Zielsetzungen
1	14.07.11	Verifikation der globalen Zeitstempelung
2	14.02.12	Verifikation des Bezugspunkts und der Orientierung des Referenzsystems Prüfung der Verfügbarkeit und Qualität der GNSS-Systeme
3	17.04.2012	Versuchsträger <ul style="list-style-type: none">Überprüfung der geloggt Dateninhalte im Datenaustauschformat (bereitgestellt aus UA Philosys) an Schnittstelle AU/CCU, des Referenzsystems sowie der nachprozessierten DatenÜberprüfung der Eigenfahrzeug- und Objektdaten-Transformationen in die Ko-PER relevanten KoordinatensystemeTestimplementierung der Auswertekette Kreuzung <ul style="list-style-type: none">Überprüfung der globalen ZeitstempelungÜberprüfung der geloggt Dateninhalte an der Schnittstelle AU/CCU, des Referenzsystems und der nachprozessierte DatenÜberprüfung der Objektdaten-Transformation in die Ko-PER relevanten Koordinatensysteme
4	24.-25.04.2012	Test der fahrzeugübergreifenden Perzeption... <ul style="list-style-type: none">auf Grundlage der Perzeptionsergebnisse der Ko-PER Partnerfahrzeuge und der Kreuzung,in den avisierten Demoszenarien der Ko-FAS Abschlussdemo Test der Güte der eingesetzten Fahrzeugeigenlokalisierungsergebnisse Test der Empfangscharakteristik von ITS-G5 im Kreuzungsumfeld

5	24.05.2012	Erster Test der fahrzeuglokalen Perzeption
6	18.07.2012	Mit Ausnahme BMW nahmen die erforderlichen Projektpartner CSEI, DAI, Delphi und MRM an der Messkampagne MK-2 entweder nicht teil oder sie erfüllten die Anforderungen nicht oder nur teilweise. MK-2 wurde daraufhin als MK-2b wiederholt.
7	10.-11.09.2012	Datenakquisition zur Entwicklung fahrzeugübergreifender Perzeption Kreuzung: Test Subsystem
8	25.10.2012	Messdatenerfassung der fahrzeuglokalen Perzeption im Kreuzungsbereich (*ref, *.mes) Messdatenerfassung der Kreuzungsperzeption (*.mes) Weitere Zielsetzungen: <ul style="list-style-type: none"> • Kommunikation der Kreuzungsdaten an die Fahrzeuge • Erfahrbarkeit von Ko-PER Szenarien an der Kreuzung
9	27.-28.06.2013	Datenakquise kooperative Lokalisierung/TCS
10	08.-09.07.2013	Test der Interoperabilität mit Ko-TAG Nachtrag zum Test der Empfangscharakteristik von ITSG5 im Kreuzungs-Umfeld Üben der Demoszenarien Test der aktuellen TCS-Software (BugFix Korrekturdaten)
11	04.-05.09.2013	Datenakquisition zur kooperative Lokalisierung / TCS
12	18.-19.11.2013	Evaluierung: Lokalisierung und kooperative Perzeption

Tabelle 19: Im Projektverlauf durchgeführte Messkampagnen

5 Austausch / Schnittstellen mit anderen BMWi Förderprojekten

Das vorliegende Kapitel ist einer kurzen Beschreibung der vom Fördergeber und Projektträger vorgeschlagenen bzw. gewünschten Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Förderprojekten gewidmet.

5.1 Austausch mit sim^{TD} (Informationsaustausch und Lieferungen)

Unter anderem aufgrund der simultanen Teilnahme diverser Schlüsselpartner sowohl im Förderprojekt Ko-PER als auch in sim^{TD}, lag es nahe, sich an den in sim^{TD} entwickelten bzw. verwendeten Lösungen zu orientieren und zwar sowohl in Bezug auf die für die Ko-PER Funktionen benötigte Nachrichten-Übertragungstechnik als auch hinsichtlich der zur kooperativen Perzeption erforderlichen Nachrichtenformate.

Folglich wurde bereits während der Ko-PER Planungsphase vereinbart, die damals noch in Entwicklung befindliche sim^{TD} Kommunikations-Hard- und Firmware zu nutzen. Der Herleitung der Ko-PER Nachrichtenformate ging eine eingehende Analyse des sim^{TD} Spezifikationsdokuments [D21.4 Spezifikation Kommunikationsprotokolle](#) voraus. Daraus wurden für Ko-PER die Nachrichtenformate zur Kommunikation der Kreuzungs-Geometrie und Topologie (MAP) und dem Status von Lichtsignalanlagen unverändert übernommen, aus Gründen der Rückwärts-Kompatibilität, weiterhin die in Ko-PER nicht wirklich benötigte CAM (*Cooperative Awareness Message*).

Für die Übertragung der erforderlichen Informationen sowohl über den dynamischen Zustand des Eigenfahrzeugs als auch dem der beobachteten Verkehrsteilnehmer erwiesen sich die sim^{TD} Nachrichtenformate und insbesondere die CAM als nicht ausreichend. Ein entsprechendes projektübergreifendes Abstimmungsgespräch hierzu fand bei einem Treffen am 30.07.2010 statt, an dem u.a. Vertreter der Industriepartner BMW, Continental und Daimler beteiligt waren. Bei diesem Treffen wurde bezüglich der Nachrichtenformate nicht nur Verständnis über zusätzlichen Ko-PER spezifischen Anforderungen signalisiert, sondern es wurde, wegen der seinerzeit fehlenden Erfahrungen auf dem Gebiet der kooperativen Perzeption, weitergehend vereinbart, für die erweiterten Nachrichtenformate zunächst eine Experimentierphase vorzusehen, während der die bei Produkteinführung zu beachtenden Randbedingungen noch unberücksichtigt bleiben konnten.

Auch die weitere Zusammenarbeit zwischen Ko-PER und sim^{TD} verlief – abgesehen von einer kompensierbar verzögerten Auslieferung der sim^{TD} Kommunikationseinheiten – konstruktiv und erfolgreich.

5.2 Schnittstelle zu Ko-TAG (Informationsaustausch und Lieferungen)

Auch bezüglich des Schwesterprojekts Ko-TAG war eine simultane Beteiligung verschiedener Industriepartner, nämlich BMW, CSEI und Daimler zu verzeichnen.

Bekanntermaßen erfahren GNSS basierte Lokalisierungslösungen im innerstädtischen Bereich aufgrund bebauungsbedingter Abschattungen von Satelliten mitunter gravierende Einschränkungen. Gemäß ursprünglicher Ko-PER Planung sollte die entsprechende Schwierigkeit durch einen im Versuchsfahrzeug schritthaltend laufenden Ko-TAG basierten Lokalisierungsansatz überwunden werden (vgl. Abschnitt 3.2.7, Seite 57). Dieses Ziel wurde seitens Ko-TAG nicht erfüllt

Fairerweise sollte aber andererseits nicht unerwähnt belieben, dass der Einsatz von Ko-TAG 2.0 Systemen zum Schutz verletzlicher Verkehrsteilnehmer im Kontext der kooperativen Perzeption, wie sie in den BMW Versuchsträgern schritthaltend demonstriert wurde (vgl. Abschnitte 3.8.1.3 und 3.8.1.5), über den genehmigten Ko-PER Arbeitsplan hinaus eine signifikante Erweiterung der Nutzbarkeit der kooperativen Perzeption darstellt.

5.3 Schnittstelle zu Ko-KOMP (Informationsaustausch)

Die Zusammenarbeit zwischen den Schwesterprojekten Ko-PER und Ko-KOMP beschränkte sich auf Informationsaustausch. Hierzu fand über das in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Ko-FAS Partnerkreistreffen hinaus

- Am 01.02.2011 ein von Ko-PER angeregtes Treffen zum Thema „Unfallanalyse und Wirksamkeitsabschätzung von passiven und präventiven Sicherheitssystemen“ statt; überdies
- wurden der Ko-KOMP Sprecher und ein Vertreter der Verkehrsunfallforschung Dresden (VUFo) eingeladen, den Gastvortrag des Ko-PER Quartalstreffens am 11.07.2012 zu bestreiten. Das Referat der Ko-KOMP Repräsentanten trug den Titel „*Nutzwertbetrachtung in Ko-KOMP*“; seitens Ko-PER wurden im Gegenzug die Ergebnisse der Fahrsimulator-Untersuchungen zum Sicherheitsgewinn durch kooperative Perzeption, wie sie beispielsweise in Abbildung 127 subsummiert sind, erstmals präsentiert.

Im Vorfeld des letztgenannten Treffens wurden Ko-KOMP die in Ko-PER erfolgten Vorarbeiten zur Szenarien-Auswahl, die sich Top-Down von der Typisierung potenzieller Unfälle herleitete zur Verfügung gestellt.

Es herrschte auf dem Treffen u.a. Konsens darüber, dass Unfalltypen hoher prozentualer Häufigkeit eine „aussterbende“ Spezies darstellen, und dass sich das verbleibende Unfallgeschehen künftig auf eine Vielzahl komplexerer Unfalltypen vergleichsweise geringer relativer Häufigkeit verteilen wird.

6 Ergebnisverbreitung

6.1 Konferenzbeiträge, Publikationen

Die Ko-PER Projektbeteiligten erarbeiteten bisher insgesamt 61 Publikationen und wissenschaftliche Beiträge zu nationalen und internationalen Workshops und Konferenzen, Eine vollständige Liste findet sich in Anhang A (öffentlich): Publikationen und Konferenzbeiträge.

Von den genannten Arbeiten wurden bisher insgesamt vier von unabhängigen Expertengremien ausgezeichnet. Es ging der

- Best Paper Award – 1st Prize des *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2012* an Martin Liebner et al. für den Beitrag: *Driver Intent Inference at Urban Intersections Using the Intelligent Driver Model*
- Best Paper Award – 2nd Prize des *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2013* an Daniel Meißner et al., MRM, Universität Ulm, für den Beitrag: *Road User Tracking at Intersections Using a Multiple-Model PHD Filter*
- Best Workshop Paper Award des *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2013* an Andreas Schindler, FORWISS, Universität Passau, für den Beitrag *Vehicle Self-localization with High-Precision Digital Maps*
- Best Paper Award des *IEEE Embedded Vision Workshop der IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2013* an Konrad Doll et al., Hochschule Aschaffenburg für den Beitrag: *FPGA-based Real-Time Pedestrian Detection on High-Resolution Images*

6.2 Internet-Auftritt

Um dem Interesse der Fachwelt sowie der interessierten Öffentlichkeit an den Arbeiten der Forschungsinitiative Ko-FAS und Ihrer drei Verbundprojekte Rechnung zu tragen, wurde eine Projekt-Homepage aufgebaut. Der entsprechende Internetauftritt ist unter dem URL www.ko-fas.de zu finden und wird auch über das Projektende hinaus auf unbestimmte Zeit gepflegt werden und zugänglich sein.

Die Projektpartner des Verbundprojekts Ko-PER haben auf dieser Projekthomepage die Schwerpunkte ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit mit Hilfe von Texten, Grafiken, Fotos und Videomaterial dargestellt. Des Weiteren wird dort die Liste der im Rahmen von Ko-PER verfassten wissenschaftlichen Publikationen geführt (siehe auch Anhang A (öffentlich): Publikationen und Konferenzbeiträge). Auch diese Liste wird entsprechend der künftig noch erfolgenden Ko-PER-bezogenen Publikationen weitergepflegt.

Abbildung 159 zeigt einen Bildschirmabzug der Einstiegsseite in den Ko-PER Teil der Ko-FAS Internet-Seite, Tabelle 20.



Abbildung 159: Screenshot der Ko-FAS Homepage mit der Einführungsseite zu Ko-PER

Hauptkategorien im Bereich Ko-PER	Unterkategorien im Bereich Ko-PER
Übersicht / Einstieg	Ko-PER Pyramide und Projektidee
Eigenlokalisierung	Eigenlokalisierung mit Kamera, Laserscanner und digitalen Karten
	Eigenlokalisierung mit Laserscannern und Landmarken
	Eigenlokalisierung mit (Tightly-Coupled) GNSS/INS Systemen
	Relative Lokalisierung mit kommunizierten GPS-Rohdaten
	Eigenlokalisierung an Kreuzungen mit Ko-TAG-Transpondern
	Fusion von verschiedenen Lokalisierungsansätzen
	Digitale Karte
Fahrzeuglokale Perzeption	Testkrenzungen
	Laserbasierte Objekterkennung
	Videobasierte Objekterkennung
	Fußgängerintensionserkennung
	Objektverfolgung und Fusion
Kreuzungsperzeption	
Kommunikation	

Fahrzeugübergreifende Perzeption	
Situationsinterpretation / Risikobewertung	
Mensch-Maschine Interaktion	Anforderungsanalyse
	Umsetzung in der Fahrsimulation
	Entwicklung Informationskonzepte
	Empirische Untersuchungen
Anwendungen / Funktionen	
Experteninformationen	

Tabelle 20: Seitenstruktur des Bereichs "Ko-PER" auf der Homepage der Forschungsinitiative Ko-FAS

6.3 Ko-PER spezifische Nachrichten (→ C2CCC)

Die in Ko-PER erarbeiteten neuen Nachrichtentypen zielen speziell auf Funktionen der präventiven Sicherheit ab. Dem entsprechend geschah die Festlegung der Nachrichteninhalte nach einem Top-Down Ansatz, bei dem primär die durch die Fahrzeugfunktionen gegebenen Erfordernisse der Perzeption und Informationsfusion und erst in zweiter Linie kommunikationstechnische Aspekte im Vordergrund standen.

Aufgrund der Neuartigkeit des Ansatzes der kooperativen Perzeption haben die in Ko-PER definierten Nachrichtenformate zwar partiell experimentellen Charakter (und sind daher für eine Standardisierung noch nicht hinreichend erprobt), orientieren sich aber andererseits dennoch an Vorgaben wie sie etwa von den Standardisierungsgremien ETSI und/oder CEN erarbeitet werden bzw. wurden. Dem entsprechend werden bzw. wurden die Ko-PER spezifischen Nachrichtentypen von den für Kommunikation zuständigen Ko-PER Partnern in die zuständigen C2C-CC (*Car2Car Communication Consortium*) Arbeitsgruppen eingebracht.

Im Einzelnen handelt es sich bei den neun Nachrichtentypen um die

- *Cooperative Perception Message* (CPM), die ihrerseits aus der so genannten
 - EIS (*Ego Information Structure*), einer Art erweiterter, CAM und einer
 - Liste wahrgenommener statischer und dynamischer Objekte
besteht. Die immobilen statischen Objekte können alternativ auch in digitalen Karten abgelegt sein.
- *Cooperative Localization Message* (CLM), die speziell für die kooperative Lokalisierung und die Evaluierung anderer GNSS basierter Eigenlokalisierungsansätze entwickelt wurde.
- verschiedener neuer DEN-Nachrichtentypen zur Gefahrenwarnung zu hochdynamischen Vorgängen, beispielsweise über unerwartete Geschwindigkeitsänderungen oder Querversätze von Fahrzeugen (SVC und SLD)²³ oder über unerwartetes Verhalten von Fußgängern und Zweirädern (PED/BIC/CYC)²⁴

Eine ausführliche Beschreibung und Spezifikation der Ko-PER Nachrichtenformate findet sich zum Download auf der Ko-PER Web-Site – vgl. [58].

²³ *Sudden Velocity Change* und *Sudden Lateral Displacement*

²⁴ *PED*strian, *BIC*yclist und *motorCYC*list

6.4 Straßen- und Fahrstreifenverlauf / hochgenaue digitale Karten

Die im Rahmen von Ko-PER entwickelten Datenformate zur Repräsentation hochgenauer Karten von Fahrbahnen Fahrspuren und begleitender Landmarken (alleinstehende Bäume, Verkehrszeichen) wurden am 27. Juni 2013 auf dem von ERTICO betreuten ADASIS-Workshop zum Thema „*New MAP Features*“ präsentiert und für die Workshop-Teilnehmer in einer nachgelagerten Ausarbeitung im Detail dokumentiert.

6.5 Veröffentlichung von Kreuzungs-Sensordaten

Auf externe Anfragen hin wurde von den Ko-PER Partnern einstimmig beschlossen, Sensordaten-Sequenzen der Aschaffener Versuchskreuzung samt Kalibrierinformation und Dokumentation öffentlich bereit zu stellen. Es handelt sich dabei durchweg um reale und nicht um gestellte Verkehrsszenen.

Um den Vorgaben des Bayerischen Datenschutzbeauftragten zu genügen und auch um das Datenaufkommen *per se* überschaubar zu halten, handelt es sich hierbei in erster Linie um Laserscanner Daten. Zugeordnete Bildfolgen werden lediglich zum Zwecke der visuellen Rückkopplung hinzugefügt und sind irreversibel anonymisiert.

Auf der ITSC 2014 wird bzw. wurde publiziert, dass und von welcher Web-Adresse entsprechenden Daten und Dokumentation heruntergeladen werden können – s.a. [63].

6.6 Dissertationen

Zu Themen des Ko-PER Projekts werden bzw. wurden zwölf, zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts bereits weitgehend abgeschlossene Doktorarbeiten an Universitäten, Hochschule und Industriebetrieben durchgeführt. Diese Arbeiten konstituieren einen ansehnlichen Beitrag zur Förderung des technisch-wissenschaftlichen Nachwuchses; darüber hinaus werden mit den zugeordneten, öffentlich verfügbaren Dissertationen die in Ko-PER entwickelten Ergebnisse und Methoden in besonderer Tiefe und Ausführlichkeit dargestellt.

7 Anhang A (öffentlich): Publikationen und Konferenzbeiträge

Im Projektverlauf wurden von den Partnern des Ko-PER-Konsortiums die folgenden nationalen und internationalen Beiträge zur Publikationen angenommen bzw. veröffentlicht (in zeitlicher Reihenfolge):

2010

- [1] Daniel Meißner, Klaus Dietmayer, "*Simulation and Calibration of Infrastructure based Laser Scanner, Networks at Intersections*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 21.-24. Juni 2010, San Diego
- [2] Andreas Schindler, Georg Maier, "*Object Detection in Gray Scale Images Based on Invariant Polynomial Features*", IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 26.-29. September 2010, Hong Kong

2011

- [3] Erich Fuchs, Reiner Wertheimer, "*Ko-PER - Cooperative Perception to Promote Driver Assistance and Preventive Safety*", Fusion Workshop EU Projekt Have-It, 22. Februar 2011
- [4] Reiner Wertheimer, Felix Klanner, "*Cooperative Perception to Promote Driver Assistance and Preventive Safety*", WIT International Workshop on Intelligent Transportation, 22. März 2011, Hamburg
- [5] Daniel Meißner, Klaus Dietmayer, "*High-Precision 3D Traffic Recognition at Intersections*", WIT International Workshop on Intelligent Transportation, 22.03.2011, Hamburg
- [6] Lali Ghosh, Mirko Meuter, Dennis Müller, Stefan Müller-Schneiders, Josef Pauli, "*A generic video and radar data fusion system for improved target selection*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 5.-9. Juni 2011, Baden-Baden
- [7] Andreas Rauch, Felix Klanner, Klaus Dietmayer, "*Analysis of V2X communication parameters for the development of a fusion architecture for cooperative perception systems*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 5.-9. Juni 2011, Baden-Baden
- [8] Daniel Weimer, Sebastian Köhler, Christian Hellert, Konrad Doll, Ulrich Brunsmann, Roland Krzikalla, "*GPU Architecture for Stationary Multisensor Pedestrian Detection at Smart Intersections*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 5.-9. Juni 2011, Baden-Baden
- [9] Martin Fritzsche, Tobias Huck, Tilo Schwarz, Antje Westenberger, Klaus Dietmayer, "*Precise Timestamping and Temporal Synchronization in Multi-Sensor Fusion*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 5.-9. Juni 2011, Baden-Baden
- [10] Georg Maier, Sebastian Pangerl, Andreas Schindler, "*Real-time detection and classification of arrow markings using curve-based prototype fitting*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 5.-9. Juni 2011, Baden-Baden
- [11] Stefan Schlotterbeck-Macht, Konrad Doll, Ulrich Brunsmann, "*Introducing Chip Design using Speed of Light*", 7th International CDIO Conference, 20.-23. Juni 2011, Lyngby
- [12] Georg Maier, Andreas Schindler (FORWISS), "*Effiziente Prototyp-Passung mittels Kreisbogensplines und Anwendungsbeispiele aus dem Automotive-Bereich*", tm – Technisches Messen: Vol. 78, No. 9, pp. 406-411, September 2011
- [13] Martin Fritzsche, Tobias Huck, Tilo Schwarz, Antje Westenberger (DAI), Klaus Dietmayer (MRM), "*Temporal Synchronization in Multi-Sensor Fusion for Future Driver Assistance Systems*", International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS), 14.-16. September 2011, München
- [14] Horst Klöden, Andreas Rauch, Felix Klanner, Daniel Schwarz, Ralph Raßhofer, "*Kooperative Ansätze zur Fahrzeugumfeldwahrnehmung*", 8. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, 5. Oktober 2011, Berlin
- [15] Georg Maier, Sebastian Pangerl, Andreas Schindler (FORWISS), "*Exploiting Arc Splines for Digital Maps and their Applications*", International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 5.-7. Oktober 2011, Washington DC

2012

- [16] Galia Weidl, Gabi Breuel, "Overall Probabilistic Framework for Modeling and Analysis of Intersection Situations", 16th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA 2012), 30.-31. Mai 2012, Berlin
- [17] Andreas Rauch, Felix Klanner, Ralph Rasshofer and Klaus Dietmayer, "Car2X-Based Perception in a High-Level Fusion Architecture for Cooperative Perception Systems", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 3.-7. Juni 2012, Alcalá de Henares
- [18] Martin Liebner, Michael Baumann, Felix Klanner and Christoph Stiller, "Driver Intent Inference at Urban Intersections using the Intelligent Driver Model", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 3.-7. Juni 2012, Alcalá de Henares; Best Paper Award
- [19] Andreas Schindler, Georg Maier and Florian Janda, "Generation of High Precision Digital Maps using Circular Arc Splines", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 3.-7. Juni 2012, Alcalá de Henares; Best Paper Award
- [20] Daniel Meißner, Stephan Reuter, Klaus Dietmayer, "Real-Time Detection and Tracking of Pedestrians at Intersections Using a Network of Laserscanners", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 3.-7. Juni 2012, Alcalá de Henares
- [21] Daniel Westhofen, Carolin Gründler, Konrad Doll, Ulrich Brunsmann, Stephan Zecha, "Transponder- and Camera-Based Advanced Driver Assistance System", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 3.-7. Juni 2012, Alcalá de Henares
- [22] Reiner Wertheimer, "Ko-PER - Präventive Sicherheit im Straßenverkehr mittels kooperativer Perzeption: Projektübersicht und ausgewählte Zwischenergebnisse", 49. Heidelberger Bildverarbeitungsforum, 3. Juli 2012, Langmeil
- [23] Michael Goldhammer, Elias Strigel, Daniel Meißner, Ulrich Brunsmann, Konrad Doll, Klaus Dietmayer, "Cooperative Multi Sensor Network for Traffic Safety Applications at Intersections", Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 16. September 2012, Anchorage, USA
- [24] Sebastian Köhler, Michael Goldhammer, Sebastian Bauer, Konrad Doll, Ulrich Brunsmann, Klaus Dietmayer, "Early Detection of the Pedestrian's Intention to Cross the Street", Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 16. September 2012, Anchorage, USA
- [25] Stephan Reuter, Daniel Meißner, Klaus Dietmayer, "Multi-Object Tracking at Intersections Using the Cardinalized Probability Hypothesis Density Filter", Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 16. September 2012, Anchorage, USA
- [26] Martin Liebner, Felix Klanner, Christoph. Stiller, "Der Fahrer im Mittelpunkt – Eye-Tracking als Schlüssel zum mitdenkenden Fahrzeug?", 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme (FAS), 26.-28. September 2012, Walting
- [27] Elias Strigel, Markus Schuster, Klaus Dietmayer, "Detektion von Fahrzeugen an Straßenkreuzungen durch Fusion mehrerer Kameraansichten", 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme (FAS), 26.-28. September 2012, Walting
- [28] Daniel Meißner, Stephan Reuter, Klaus Dietmayer, "Multi-Model-PHD-Filter zur Verfolgung von Verkehrsteilnehmern an Kreuzungen mit Laserscannern", 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme (FAS), 26.-28. September 2012, Walting
- [29] Frederik Naujoks, Heidi Grattenthaler, Alexandra Neukum, "Zeitliche Gestaltung effektiver Fahrerinformationen zur Kollisionsvermeidung auf der Basis kooperativer Perzeption", 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme (FAS 2012), 26.-28. September 2012, Walting
- [30] Felix Klanner, Ralph Raßhofer, Martin Liebner, Andreas Rauch, Felix Schwarz (BMW), "Fahrerassistenzsysteme - Eine neue Dimension der Fahrzeugsicherheit", Elektronik Automotive, 29.10.2012
- [31] Konrad Doll, Ullrich Brunsmann, "Fußgängerschutz im Straßenverkehr", VDMA Technologietage Industrielle Bildverarbeitung, 6. November 2012, Stuttgart
- [32] Georg Maier, Andreas Schindler, Florian Janda, Stephan Brummer, "Integration von Strecken in die Kreisbogensplinepassung mit optimaler Segmentzahl", Forum Bildverarbeitung 95-106. KIT Scientific Publishing, 1. Dezember 2012, Karlsruhe

- [33] Georg Maier, Florian Janda, Andreas Schindler, "*Minimum Description Length Arc Spline Approximation of Digital Curves*", International Conference on Image Processing (ICIP), 30. September bis 3. Oktober 2012, Orlando

2013

- [34] Roland Krzikalla, Andreas Schindler, Matthias Wankerl und Reiner Wertheimer, „Mehr Sicherheit durch Positionsbestimmung mit Satelliten und Landmarken / Improving Safety by Self-Localization Using Satellites and Landmarks“ ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift / ATZ Worldwide eMagazines 01/2013), Springer Vieweg Verlag. 28.12.2012
- [35] Frederik Naujoks, Heidi Grattenthaler, Alexandra Neukum, "*Auswirkungen von Spezifität und Zeitpunkt früher Fahrerinformationen zur Kollisionsvermeidung in urbanen Szenarien*", 55.Tagung experimentell arbeitender Psychologen, 24. März 2013, Wien, Österreich
- [36] Martin Liebner, Felix Klanner, M. Baumann, C. Ruhhammer, Christoph Stiller, "*Velocity-based driver intent inference at urban intersections in the presence of preceding vehicles*", Intelligent Transportation Systems Magazine (Volume: 5, Issue: 2), 1. April 2013
- [37] Andreas Schindler, "*Fahrzeug-Eigenlokalisierung mit hochgenauen digitalen Karten*", Safety Week Aschaffenburg 2013, 13. Mai 2013, Aschaffenburg
- [38] Michael Hahnle, Frerk Saxen, Mathias Hisung, Ulrich Brunsmann, Konrad Doll, "*FPGA-based Real-Time Pedestrian Detection on High-Resolution Images*", Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 23. Juni 2013, Portland, USA; Best Paper Award
- [39] Elias Strigel, Daniel Meißner, and Klaus Dietmayer, "*Vehicle Detection and Tracking at Intersections by Fusing Multiple Camera Views*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 23. Juni 2013, Gold Coast, Australien
- [40] Daniel Meißner, Stephan Reuter, Klaus Dietmayer, "*Road User Tracking at Intersections Using a Multiple-Model PHD Filter*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 23. Juni 2013, Gold Coast, Australien; Best Paper Award 2nd prize
- [41] Andreas Schindler, "*Vehicle Self-localization with High-Precision Digital Maps*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 23. Juni 2013, Gold Coast, Australia; Best Workshop Paper Award
- [42] Martin Liebner, Felix Klanner, Christoph Stiller, "*Active Safety for Vulnerable Road Users based on Smartphone Position Data*", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 23. Juni 2013, Gold Coast, Australien
- [43] Erich Fuchs, Andreas Schindler, Reiner Wertheimer, "*Circular Arc Splines to Represent High Precision Digital Maps for Cooperative ADAS*", ADASIS New Features Workshop, 27. Juni 2013, Erlangen
- [44] Daniel Meißner, Stephan Reuter, Benjamin Wilking, Klaus Dietmayer, "*Road User Tracking Using a Dempster-Shafer Based Classifying Multiple-Model PHD Filter*", 16th International Conference on Information Fusion (FUSION), 9.-12. Juli 2013, Istanbul
- [45] Sebastian Köhler, Michael Goldhammer, Sebastian Bauer, Stephan Zeche, Konrad Doll, Ulrich Brunsmann, Klaus Dietmayer, "*Stationary Detection of the Pedestrian's Intention at Intersections*", IEEE-Intelligent Transportation Systems Magazine, 22. Juli 2013
- [46] Galia Weidl, Virat Singhal, Dominik Petrich, Dietmar Kasper, Andreas Wedel, Gabi Breuel, "*Collision Detection and Warning at Road Intersections using an Object Oriented Bayesian Network*", IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), 5.-7. September 2013, Cluj-Napoca
- [47] Andreas Rauch, Stefan Maier, Felix Klanner, Klaus Dietmayer, "*Inter-Vehicle Object Association for Cooperative Perception Systems*", 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 6.-9. Oktober 2013, Den Haag
- [48] Michael Goldhammer, Matthias Gerhard, Stefan Zernetsch, Konrad Doll, Ulrich Brunsmann, "*Early Prediction of the Pedestrian's Trajectory at Intersections*", 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 6.-9. Oktober 2013, Den Haag

- [49] Dominik Petrich, Thao Dang, Dietmar Kasper, Gabi Breuel, Christoph Stiller, "Map-based Long Term Motion Prediction for Vehicles in Traffic Environments", 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 6.-9. Oktober 2013, Den Haag
- [50] Frederik Naujoks, Heidi Grattenthaler, Alexandra Neukum, "Fahrerseitiger Unterstützungsbedarf in drohenden Verkehrskonfliktszenarien und Wirksamkeitsuntersuchung frühzeitiger Fahrerinformationen basierend auf kooperativer Umfelderkennung", 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme: Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion, 10. Oktober 2013, Berlin
- [51] Daniel Meißner, Stephan Reuter, Klaus Dietmayer, "Combining the 2D and 3D World: A New Approach for Point Cloud Based Object Detection", The 1st IET Intelligent Signal Processing Conference (ISP), 2.-3. Dezember 2013, London

2014

- [52] Kolb, L., Naujoks, F. & Neukum, A. (2014). „Frühzeitige Fahrerunterstützung bei zeitkritischen urbanen Verkehrskonflikten – ist eine rein visuelle Fahrerinformation ausreichend?“, 56. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP), Gießen, 30.03-02.04.2014.
- [53] Naujoks, F. & Neukum, A. (2014). „Situative Faktoren in der Entstehung von Kreuzungskonflikten und Wirksamkeit einer frühzeitigen Fahrerunterstützung“, 56. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP), Gießen, 30.03-02.04.2014.
- [54] Schöttl, D., Naujoks, F. & Neukum, A. (2014), „Fahrer- und Blickverhalten bei fehlerhaften Richtungsinformationen über drohende Kreuzungskonflikte“, 56. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP), Gießen, 30.03-02.04.2014
- [55] Naujoks, F. & Neukum, A. (2014), "Timing of in-vehicle advisory warnings based on cooperative perception", in D. de Waard, K. Brookhuis, R. Wiczorek, F. di Nocera, R. Brouwer, P. Barham, C. Weikert, A. Kluge, W. Gerbino, & A. Toffetti (Eds.), Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting (S.193-206)
- [56] Daniel Meißner, Stephan Reuter, Elias Strigel, Klaus Dietmayer, "Intersection-Based Road User Tracking Using a Classifying Multiple-Model PHD Filter", Intelligent Transportation Systems Magazine Vol. 6, No 2, pp 21-33, Summer 2014
- [57] Matthias Wankerl, Gert F. Trommer, "Evaluation of a Segmented Navigation Filter Approach for Vehicle Self Localization in Urban Environment", ISSN 2075 1087, Gyroscopy and Navigation, 2014, Vol. 5, No. 2, pp. 98–107
- [58] Ulrich Brunsmann, Florian Seeliger, Reiner Wertheimer, „Ko-PER spezifische Nachrichteninhalte“, April 2014, URL http://ko-fas.de/files/abschluss/ko-per-spezifische_nachrichteninhalte_oeffentlich.zip
- [59] Autoren dieses Berichts gemäß S. 2, Fahrerassistenz und präventive Sicherheit mittels kooperativer Perzeption, Partnerübergreifender Schlussbericht, Juni 2014, vgl. URL http://ko-fas.de/files/19-S-9022_Ko-PER_partnerübergreifender-Schlussbericht.pdf
- [60] F. Seeliger, G. Weidl, D. Petrich, F. Naujoks, G. Breuel, A. Neukum, K. Dietmayer, "Advisory warnings based on cooperative perception", Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, 08.06.–11.06.2014. (accepted for publication)
- [61] Naujoks, F., Grattenthaler, H. & Neukum, A. (2014). Effectiveness of advisory warnings based on cooperative perception. 10th ITS European Congress, Helsinki, 16.06–19.06.2014. (accepted for publication)
- [62] Florian Seeliger, Klaus Dietmayer, "Inter-Vehicle Information-Fusion with Shared Perception Information" IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC 2014, 8.-11. Oktober 2014, Qingdao, China (submitted for publication)
- [63] Elias Strigel, Daniel Meißner, Florian Seeliger, Benjamin Wilking, Klaus Dietmayer, "The Ko-PER Intersection Laserscanner and Video Dataset"; IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC 2014, 8.-11. Oktober 2014, Qingdao, China (submitted for publication)