



## **Forschungsinitiative Ko-FAS – Verbundprojekt Ko-TAG**

### **Schlussbericht des Verbundprojektes Ko-TAG**

Förderkennzeichen (Gesamtprojekt)	19 S 9011
Vorhabenbezeichnung	Ko-TAG - Fahrzeugsicherheit durch kooperative Sensortechnologien
Laufzeit des Vorhabens	01.08.2009 bis 30.11.2013
Berichtszeitraum	01.08.2009 bis 30.11.2013
Version	Version 1.0

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Autoren:**

Daniel Schwarz, BMW AG  
Marc Faßbinder, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen  
Gerrit Kalverkamp, Technische Universität München  
Horst Klöden, BMW Group Forschung und Technik  
Sebastian Krug, ZENTEC GmbH  
Erich Lankes, Daimler AG  
Panagiotis Paschalidis, Heinrich-Hertz-Institut  
Bernhard Schaffer, Technische Universität München  
Manuel Schappacher, Steinbeis Innovationszentrum für Embedded Design und Networking  
Axel Sikora, Steinbeis Innovationszentrum für Embedded Design und Networking  
Stephan Zecha, Continental Safety Engineering International GmbH

**Ergebnisverbreitung**     Öffentlich (mit Ausnahme der Anhänge B und C)  
                                   BMWi / Projektträger  
                                   Ko-TAG  
  Ko-PER  
  Ko-KOMP

**Dateiname**                            19-S-9011\_Ko-TAG\_partnerübergreifender-  
Schlussbericht\_final.docx

**Seitenzahl**                            142

# Inhaltsverzeichnis

1	Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung .....	18
2	AP: Herausforderungen, untersuchte Methoden, Ergebnisse .....	21
2.1	Gesamtsystemkonzept .....	21
2.1.1	Rahmenbedingungen .....	21
2.1.1.1	Untersuchung verfügbarer Bänder .....	21
2.1.1.2	Konzepte für Selbsttest der Ortungseinheit .....	21
2.1.2	Systemspezifikation .....	21
2.1.2.1	Mobile Senderempfänger .....	21
2.1.2.2	Ortungseinheit .....	22
2.1.2.3	VRU Schutzsystem .....	24
2.1.2.4	Rundumsicherheit .....	26
2.1.3	Protokollspezifikation .....	30
2.1.3.1	Konzept Physikalische Übertragung .....	30
2.1.3.2	Energiemanagement .....	31
2.1.3.3	Konzept Medium Access Control .....	32
2.1.3.4	Security und Safety .....	40
2.1.3.5	Spezifikation Rahmenformate .....	40
2.1.3.6	Netzwerkintegration .....	40
2.2	Mobile Sendeempfänger .....	42
2.2.1	Erstellung Prototypen Sendeempfänger .....	42
2.2.1.1	Layout HF Teil .....	42
2.2.1.2	Schaltplan und Layout Logikteil .....	43
2.2.2	Implementierung Hw/Sw-Firmware für Sendeempfänger .....	44
2.2.2.1	MAC-Funktionalität .....	44
2.2.2.2	Security / Safety .....	49
2.2.2.3	Ortungssystem .....	51
2.2.3	Integration INS Sensorknoten Sendeempfänger .....	52
2.2.3.1	Detektion der Trageposition vom TAG .....	52
2.2.3.2	Bewegungsklassifikation .....	53
2.3	Bordautonome Ortungseinheit .....	54
2.3.1	Gesamtkonzept Ortungseinheit .....	54
2.3.1.1	Integration Goniometer/Abstandsmesssystem .....	54
2.3.1.2	Schnittstelle Fahrzeuganwendungen .....	55
2.3.2	Abstandsmesssystem .....	56
2.3.2.1	Evaluierung Miniaturisierungskonzepte .....	56

2.3.2.2	Optimierte Bandbreitennutzung .....	56
2.3.2.3	Erstellung Prototyp Abstandsmesssystem.....	57
2.3.3	Goniometer.....	58
2.3.3.1	Miniaturisierung Goniometer .....	58
2.3.3.2	Antennenarray VRU Schutz .....	60
2.3.3.3	Erhöhung Störfestigkeit.....	61
2.3.3.4	Erstellung Prototyp Goniometer .....	62
2.4	Integration Ortungs- und Kommunikationskonzept .....	65
2.4.1	Architektur .....	65
2.4.1.1	Safety und Security in einem integrierten Konzept .....	65
2.4.1.2	Protokollanpassungen für Infrastrukturanwendungen.....	67
2.4.1.4	Antennenintegration und Charakterisierung.....	71
2.4.1.5	Ausbau Funkkanalmesssystem .....	73
2.4.1.6	Dynamische Schwellenanpassung .....	76
2.4.1.7	Einheitliche Firmware-Update Funktionalität.....	77
2.4.1.8	Hardwarebeschleunigung bei DoA Berechnung .....	77
2.4.2	Umsetzung und Bewertung der Gesamtarchitektur .....	79
2.4.2.1	Breitbandige Winkelschätzung auf Kommunikationssignale.....	79
2.4.2.2	Informationübertragung in ToF-Beacons .....	81
2.4.2.3	Funkkanalmessungen für Ko-TAG-relevante Szenarien.....	81
2.4.2.4	Änderungen für Car2Car Kompatibilität .....	88
2.4.2.5	Diversitykonzept für Gesamtarchitektur .....	88
2.5	Standardisierung .....	89
2.5.1	Analyse und Bewertung bestehender Systeme .....	89
2.5.1.1	Untersuchung verfügbarer Chipsets zur Anwendung für Ortung .....	89
2.5.1.2	Störfestigkeit und Kompatibilität bzw. Koexistenz.....	89
2.5.2	Optimierung Signalverarbeitung / Arbeitsplan IEEE 802.11p Konformität .....	93
2.5.2.1	Entwurf und Implementierung eines echtzeitfähigen digitalen Transceivers zur Car2X Funkdatenübertragung, Optimierung, Interoperabilität und Konformität mit dem IEEE 802.11p Standard. .	93
2.5.2.2	Optimierung der Empfänger-Signalverarbeitung für stark zeitvariante Funkkanäle.....	99
2.6	Ergebnisse und Fahrzeuganwendungen.....	100
2.6.1	Testmessungen.....	100
2.6.1.1	Bereitstellung Testumgebung .....	100
2.6.1.2	Durchführung Messungen.....	101
2.6.1.3	Bewertung Ergebnisse .....	104
2.6.2	Umfeldmodelle .....	104

2.6.2.1	Modell Ego Fahrzeug .....	104
2.6.2.2	Bewegungsmodell Fußgänger .....	106
2.6.2.3	Bewegungsmodell Radfahrer .....	106
2.6.2.4	Modell Fremd-PKW .....	108
2.6.3	System VRU-Schutz .....	109
2.6.3.1	Fusion für VRU Schutz .....	109
2.6.3.2	Auslösealgorithmen .....	111
2.6.3.3	Schutzmaßnahmen .....	113
2.6.3.5	Aufbau Demofahrzeug für VRU Schutz und RUS .....	119
2.6.3.6	Schutz von Radfahrern .....	119
2.6.4	System Rundumsicherheit .....	122
2.6.4.1	Sicherheitsgewinn durch Ortung verdeckter Objekte .....	122
2.6.4.2	Auslösealgorithmen .....	127
2.6.5	Weitere Anwendungen .....	132
2.6.5.1	Eigenlokalisierung .....	132
2.6.5.2	Transponder als stationäres Referenzsystem .....	135
2.6.5.3	Transponder als dynamisches Referenzsystem .....	138
3	Anhang A (öffentlich): Publikationen und Konferenzbeiträge .....	141

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Blockschaltbild VRU Einheit.....	22
Abbildung 2: Safetag v2.0 Frontblende mit den Anschlüssen Power (links), Antenne AUX (mitte) und Antenne MAIN (rechts), sowie Ethernet-Schnittstelle für Firmware-Update und Einstellungen .....	22
Abbildung 3: <i>Blockschaltbild On-Board-Unit v2.0 (Quelle: sizedn)</i> .....	23
Abbildung 4: Systemblockschaltbild mit Schnittstellen im Demonstrator .....	24
Abbildung 5: Integration der kooperativen Sensorik in das Gesamtsystem.....	26
Abbildung 6: Systemansatz aktive 360° Rundumortung .....	26
Abbildung 7: Systemansatz passive 360° Rundumortbarkeit .....	27
Abbildung 8: Durch RUS adressierbare Unfalltypen .....	28
Abbildung 9: Auswertung Unfalldatenanalyse Typ 3.....	29
Abbildung 10: Blockdiagramm System RUS.....	30
Abbildung 11: Zeitraster im Kanal der Abstandsmessung .....	31
Abbildung 12: Energiesparzustände im Prototypensystem.....	32
Abbildung 13: Ko-TAG Netzwerkstruktur .....	33
Abbildung 14: Zeitschlitzkonfiguration eines Subnetzes .....	34
Abbildung 15: Aufbau eines TOF Superframes .....	35
Abbildung 16: Aufbau eines AOA Superframes .....	36
Abbildung 17: Beispiel eines AOA Beacons .....	36
Abbildung 18: Aufbau eines Superframes im Steuerkanal.....	37
Abbildung 19: Superframe Durchlauf eines Koordinators .....	37
Abbildung 20: Kommunikationsablauf bei Devices .....	38
Abbildung 21: Allgemeines MAC Rahmenformat.....	40
Abbildung 22: OPNET Beispielszenario.....	41
Abbildung 23: Prozesse des OPNET Simulationsmodells .....	42
Abbildung 24: Vereinfachtes Blockschaltbild des SafeTAG 2.0 Transponders.....	42
Abbildung 25: SafeTAG 2.0 HF-Frontend .....	43
Abbildung 26: Skizze des Base-Boards und dessen relevanten Bauteilen.....	44

Abbildung 27: Skizze des DBM3_2AGX260 und dessen relevanten Bauteilen.....	44
Abbildung 28: Finale Kommunikationsplattform (inkl. Debug-Header) .....	44
Abbildung 29: Generelle Architektur des Ko-TAG Systems.....	45
Abbildung 30: Architektur der Lokalisierungseinheit .....	46
Abbildung 31: Architektur des SafeTAGs.....	47
Abbildung 32: Aufbau des Prozessorsystems des Communication & Control Moduls .....	48
Abbildung 33: Aufbau der Softwareimplementierung.....	49
Abbildung 34: Softwaredesign Sicherheitsarchitektur.....	51
Abbildung 35: Ablauf der Ortung zwischen Auto- und Fußgängereinheit .....	52
Abbildung 36: Vereinfachtes Blockschaltbild der Bewegungsklassifikation .....	52
Abbildung 37: Entscheidungsbaum (decision tree) der Klassifikation.....	53
Abbildung 38: Sondersituation: Autofahren - Wurf.....	54
Abbildung 39: Bewegungsarten: Stehen - Gehen - Rennen - Fahrradfahren .....	54
Abbildung 40: Übersicht der Nachrichten zwischen Ortungs- und Fusionseinheit.....	56
Abbildung 41: Ortungseinheit des SafeTAG 2.0 Systems .....	58
Abbildung 42: Geöffneter Transponder .....	58
Abbildung 43: Datenpaket mit angehängten AoA Tail .....	58
Abbildung 44: Ortungseinheit mit abgesetzter Antenneneinheit.....	59
Abbildung 45: Integration der verschiedenen Entwicklungsstufen.....	60
Abbildung 46: 1D- Antennenarray .....	60
Abbildung 47: 2D-Antennenarray.....	61
Abbildung 48: MUSIC-Spektren mit vorwärts-rückwärts Glättung ( $N_a = 5$ ) für die Annahme eines Signals (a) und die Annahme zweier Signale (b) .....	61
Abbildung 49: Frequenzplan 6 Kanal Goniometer mit einem ADC .....	62
Abbildung 50: Digitale Kanaltrennung.....	63
Abbildung 51: HF-Frontend-Unit .....	63
Abbildung 52: Digitalboard basierend auf einem Spartan 3A-DSP und Ti64xx DSP .....	64
Abbildung 53: HF-Frontend .....	64
Abbildung 54: Sicherheitsarchitektur.....	66

Abbildung 55: Simulierte Antwortzeiten eines Netzwerkes mit 10 OBUs und 5 VRUs .....	69
Abbildung 56: Beispielhafter Ablaufs im Wettbewerbsbehaffeten Ansatz.....	69
Abbildung 57: Ansatz – Maximale TOF-Antwortzeiten gemessen vom Startzeitpunkt der Geräte.....	70
Abbildung 58: Netz-B (10OBUs-50VRUs) – Antwortzeiten gemessen vom Startzeitpunkt der.....	71
Abbildung 59: Netz-B (10OBUs-50VRUs) – Durchschnittliche Frequenz erfolgreicher Anfragen pro Gerät.....	71
Abbildung 60: Phasendifferenz zwischen den Antennenelementen abhängig von der Polarisation des Sendesignals.....	72
Abbildung 61: Verzerrungen im 2D-MUSIC-Spektrum der zirkularen Antenne bei Azimut-Auslenkung des Senders in der Antennenhalle. ....	72
Abbildung 62: Zufahrt des Schätzers auf (a) halbverdeckten und (b) viertelverdeckten Sender. ....	72
Abbildung 63: Modul zur Hochfrequenzleistung von vier Kanälen. Im Bild ohne abschirmendes Metalgehäuse zur Funktionsüberprüfung eingebaut. ....	74
Abbildung 64: 2 HF-Schaltergruppen, funktionsbereit im Gehäuse des HHI-Channel- Sounders eingebaut und integriert.....	75
Abbildung 65: Update Seite eines Ko-TAG Gerätes .....	77
Abbildung 66: Frequenzplan Demonstrator .....	80
Abbildung 67: MUSIC Spektrum: links ungefiltert, rechts 2D Median gefiltert .....	80
Abbildung 68: links MUSIC-Spektrum von Empfangssignal, mitte Spektrum des Empfangssignals, rechts räumliches MUSIC-Spektrum von 2 überlagerten Stör-Signalen.....	81
Abbildung 69: Optimierter Aufbau zur Verifikation der ausgewählten Kalibrationsverfahrens.....	83
Abbildung 70: Struktur der OPNET Simulation (Quelle: OPNET Wireless Module User Guide for Modeler).....	86
Abbildung 71: Dauer eines gesendeten IEEE 802.11p Pakets.....	87
Abbildung 72: SafeTAG 2.0 Transponder mit 2 Antennen für Diversity-Betrieb .....	89
Abbildung 73: Beispielhafter Aufbau des Ko-TAG Emulators .....	90
Abbildung 74: Paketerfolgsraten in einem ungestörten Kanal .....	91
Abbildung 75: Verhalten der Abstandsmessung in einem ungestörten Kanal .....	92
Abbildung 76: Paketansicht des C2X Demonstrators .....	93

Abbildung 77: Kartenansicht des C2X Demonstrators.....	93
Abbildung 78: Struktur des implementierten dPHY Transceivers, oben: Sender, unten: Empfänger .....	96
Abbildung 79: Exemplarische Ergebnisse von dPHY-Tests auf der digitalen Testbench, links: Daten aus dem Monitormodul, Mitte: Frame Error Häufigkeit über den SNR-Wert, rechts: Fehler der Frequenzoffsetschätzung in Abhängigkeit vom SNR-Wert.....	97
Abbildung 80: Drei grundlegende Channel-Tracking Verfahren (Abdulhamid, Abdel- Raheem, & Tepe) .....	99
Abbildung 81: Implementierte Empfängerstruktur mit DFE .....	100
Abbildung 82: Übersicht Continental Safety Park .....	100
Abbildung 83: Bereiche des Continental Safety Parks.....	101
Abbildung 84: Szenario PKW-Verdeckung .....	102
Abbildung 85: Rohdatenverlauf bei PKW-Viertelverdeckung.....	102
Abbildung 86: Szenario Parklücke .....	102
Abbildung 87: Rohdatenverlauf bei parklückenähnlicher PKW-Viertelverdeckung.....	103
Abbildung 88: Szenario Busverdeckung .....	103
Abbildung 89: Rohdatenverlauf bei Bus-Viertelverdeckung.....	104
Abbildung 90: Kinematische Größen am linearen Einspurmodell.....	105
Abbildung 91: Zurückgelegter Weg des Fahrzeugs in einem Zeitintervall .....	105
Abbildung 92: Testszenarien Bewegungsmodell Fußgänger.....	106
Abbildung 93: Relation IST-Geschwindigkeit zu möglicher Beschleunigung .....	106
Abbildung 94: Testkonfigurationen Radfahrttests .....	107
Abbildung 95: Gefilterte Messdaten aus ausgewählten TestszenarienModell Fremd- PKW 108	
Abbildung 96: Fahrzeug-Bewegungsspielraum eines Durchschnittsfahrers bis 30 m/sSystem VRU Schutz .....	109
Abbildung 97: Fusionsarchitektur für VRU-Schutz.....	110
Abbildung 98: Systemarchitektur des vorausschauenden Fußgängerschutzsystems .....	111
Abbildung 99: Funktionsprinzip des APC-Modells .....	112
Abbildung 100: Bewegungsflächen bei unterschiedlichen Laufgeschwindigkeiten für eine Zeit von einer Sekunde.....	112

Abbildung 101: Funktionsprinzip des WAPC-Modells.....	113
Abbildung 102: Flussdiagramm des Ko-TAG Schutzsystems.....	114
Abbildung 103: Lateraltransformation .....	115
Abbildung 104: Warnsymbole für Fahrerinformation "Fußgänger kreuzend von links", "Fußgänger kreuzend von rechts" und "Fußgänger auf der Fahrbahn" .....	115
Abbildung 105: Definition der Informations- und Warnbereiche im Lateralkoordinatensystem.....	116
Abbildung 106: Durch Prädiktion der Radfahrerbewegung wird bestimmt, ob sich das Fahrrad im erweiterten Warnbereich befinden wird, wenn es sich auf gleicher Höhe mit dem Fahrzeug befindet.....	117
Abbildung 107: Aufteilung der prädizierten Radfahrerpositionen in den Informationsbereich (gelb) und den Warnbereich (rot) .....	117
Abbildung 108: Zur Bestimmung der Kollisionswahrscheinlichkeit werden mögliche Aufenthaltsbereiche der Verkehrsteilnehmer berechnet .....	118
Abbildung 109: Versuchsfahrzeug BMW F10 (528i) mit Einbaupositionen von Ortungseinheit und Kamera.....	118
Abbildung 110: Erprobungsträger in der Machbarkeitsphase zu Projektbeginn .....	119
Abbildung 111: Finaler Erprobungsträger mit Ko-TAG 2.0 Technologie .....	119
Abbildung 112: Möglicher Bewegungsspielraum für einen Radfahrer, der sich am Ort (0,0) befindet und sich in positiver x-Richtung bewegt, Vergleich zwischen dem empirischen Modell (EM) und dem Punktmodell (PM).....	120
Abbildung 113: Übersicht der getesteten Radfahrerszenarien .....	121
Abbildung 114: Testplan mit 140 aufgezeichneten Szenarien .....	122
Abbildung 115: Aufgetretene maximale Kollisionswahrscheinlichkeiten in den 140 getestet Szenarien.....	122
Abbildung 116: (Ko-PER) Referenzkreuzung am Campus der Hochschule Aschaffenburg.....	123
Abbildung 117: Grundriss (Lage- / Vermessungsplan) der (Ko-PER) Referenzkreuzung ...	124
Abbildung 118: Sichtverdeckung an Gebäudeecken .....	125
Abbildung 119: LoS-Vorwarnzeiten in Verdeckungssituationen .....	126
Abbildung 120: Kollisionspfaderkennung .....	127
Abbildung 121: Kollisionspunktbestimmung bei Variation der Geschwindigkeit .....	127
Abbildung 122: Fehlerrechnung bei der Kollisionspfadbestimmung .....	128

Abbildung 123: Tool zur Entwicklung und Validierung der Auslösealgorithmen .....	128
Abbildung 124: Handlungskonzept in fünf Stufen zur Einleitung von Schutzmaßnahmen ..	129
Abbildung 125: Eingesetzte Versuchsträger für Systemintegration .....	130
Abbildung 126: Integration der Ko-TAG OBU auf dem Querträger der S-Klasse .....	131
Abbildung 127: Modifizierter Stoßfänger mit "Rapid Prototyping" OBU-Haube .....	131
Abbildung 128: Hardware – Setup für Fahrerassistenz (Auslöseeinheit).....	132
Abbildung 129: HMI HW-Schnittstellen im Versuchsträger.....	132
Abbildung 130: Applikation der Ko-TAG Lokalisierung an der Ko-PER Versuchskreuzung mittels zweier, diagonal angeordneter kooperativer Landmarken in einer Höhe von ca. 4m und einem diagonalen Abstand von ca. 26,8m. ....	133
Abbildung 131: Veranschaulichung der kartierten Kreuzung mit beiden Landmarken. Das Koordinatensystem hat auf Grund der Übersichtlichkeit den Ursprung in der Kreuzungsmitte, die Koordinatenachsen verlaufen entlang der Spuren. Neben der Position $\langle x, y \rangle$ wird durch die Eigenlokalisierung die Ausrichtung $\gamma$ bestimmt, diese entspricht dem Winkel zwischen dem Vektor der Fahrzeuginnenachse und dem Einheitsvektor der x-Achse. ....	134
Abbildung 132: Darstellung einer Testfahrt: Referenz, Rohdaten und Ergebnis des Filters. 134	
Abbildung 133: Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im Headingwinkel aller Testfahrten unter Verwendung der Aschaffenburg Kreuzungsgeometrie bei geringer Geschwindigkeit.....	135
Abbildung 134: Funktionsprinzip der Trilateration in zweidimensionalen Raum.....	136
Abbildung 135: Antenne der Onboard Einheit.....	136
Abbildung 136: Ständer eines Roadside-TAGs .....	136
Abbildung 137: Mögliches Messfeld-Setup .....	137
Abbildung 138: Beispiel einer Slalomfahrt auf dem Flugplatz Aschaffenburg Nilkheim.....	137
Abbildung 139: Positionsabweichung in X-Richtung .....	138
Abbildung 140: Positionsabweichung in Y-Richtung.....	138
Abbildung 141: Prinzip der eindimensionalen Objektreferenzierung für Notbremsassistenten .....	139
Abbildung 142: Distanzwertvergleich Ko-TAG zu RTK-DGPS.....	139

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>Systemeigenschaften Ko-TAG Ortungseinheit</i> .....	23
Tabelle 2: Verwendete Funkkanäle der PHY-Schicht .....	33
Tabelle 3: Beschreibung zum Kommunikationsablauf von Devices.....	38
Tabelle 4: Gesamtperformance des MUSIC Algorithmus in Abhängigkeit vom Modus und Dateityp.....	78
Tabelle 5: Performance der Teilschritte in Abhängigkeit vom Setup .....	78
Tabelle 6: Paketerfolgsraten der unterschiedlichen Emulationsdurchläufe .....	91

# 1 Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung

Grundlage für zukünftige Fahrerassistenz- und aktive Sicherheitsfunktionen ist die zuverlässige Erfassung des Fahrumfeldes mit Hilfe moderner Sensorik, die in der Lage ist, ein möglichst detailreiches Modell des aktuellen Fahrumfeldes in einen Rechner abzubilden. Bisher realisierte Systeme verwendeten eine Reihe bekannter, boardautonomer Sensorsysteme wie Radar, Laser Radar („Lidar“), Videokameras, Infrarotkameras, Stereokamerasysteme, Laufzeitkameras („3D-Kameras“) oder Ultraschall – Sensorik, um Objekte im unmittelbaren Umfeld des Fahrzeuges zu detektieren, ihre Position zu bestimmen und soweit möglich eine Klassifikation durchzuführen. Es wurde neben der erfolgreichen Nutzung von Einzelsensoren eine Reihe von Systemen gezeigt, die durch Fusion der Daten aus mehreren Sensoren Qualitätssteigerungen bei der Detektion, der Ortung und der Klassifizierung darstellen konnten. Alle bisher bekannten Systeme sind aber nicht in der Lage, eine absolut zuverlässige Klassifikation der detektierten Objekte durchzuführen. Dies gilt speziell dann, wenn keine optische Sichtverbindung zwischen dem Fahrzeug und dem zu erfassenden Objekt vorliegt.

Zu den zwei wichtigsten Einschränkungen heute bekannter Fahrumfelderfassungssysteme gehören:

- Detektion und Tracking von Verkehrspartnern ist nur bei ungestörter Sichtverbindung möglich.
- Güte der Klassifikation von Verkehrspartnern lässt sich nur in engen Grenzen steigern und reicht für die Entscheidung zu effektiven, autonomen Maßnahmen des Fahrzeuges nicht aus.

Das im Projekt Ko-TAG entwickelte System ist in der Lage, beide oben genannten Nachteile heutiger Fahrumfelderfassungssysteme zu überwinden. Es basiert auf einem kooperativen Prinzip, das dem aus der Avionik bekannten System des Sekundärradars entspricht und die dort verwendeten Prinzipien für die Bedürfnisse des Straßenverkehrs adaptiert. Verkehrsteilnehmer tragen bei dem von Ko-TAG verfolgten Ansatz preiswerte, miniaturisierte Sendempfangser (sog. „Safe-TAGs“), die in der Lage sind, auf einen elektromagnetischen Abfrageimpuls hin mit einem gewissen Code zu antworten.

Der Code enthält anonymisierte Informationen über die Art des Verkehrsteilnehmers (z.B. Fußgänger, Radfahrer, Auto, etc.). Darüber hinaus können weitere spezifische Daten übertragen werden, z.B. bei Fahrzeugen deren Masse, Länge und Breite, bzw. bei Fußgängern deren Bewegungsprofil.

Der vom Sendempfangser emittierte Antwortimpuls wird vom abfragenden Fahrzeug mit Hilfe eines speziellen Mehrfachantennensystems empfangen, welches in der Lage ist, den Azimutwinkel der einfallenden Strahlung zu bestimmen („Smart Antenna“, „Digital Beamforming“). Wie in Vorarbeiten gezeigt wurde, kann diese Winkelbestimmung bei Wahl einer geeigneten Arbeitsfrequenz auch im Fall optischer Verdeckung und Störung durch Mehrwegeausbreitung mit hoher Präzision erfolgen. Damit sind bei typischen Fahrgeschwindigkeiten im innerstädtischen Straßenverkehr in Echtzeit Aussagen möglich, ob sich eine Person auf dem Gehweg oder auf der Straße befindet. In Kombination mit Bewegungsmodellen von Personen ist weiterhin möglich zu ermitteln, ob die den Sendempfangser tragende Person die Möglichkeit hat, in den Fahrschlauch des Fahrzeuges zu gelangen und eine Kollisionsgefahr zu erzeugen.

Das Mehrfachantennensystem wird dabei nicht nur zu den im Projekt Ko-TAG beschriebenen Ortungsaufgaben genutzt werden, es ist ferner eine Synergie mit Fahrzeug-Fahrzeug Kommunikationssystemen („Car2Car“ bzw. „Car2X“) möglich, in denen das Mehrfachantennensystem im Sinne eines hochempfindlichen Diversity- oder MIMO Empfangssystems arbeitet und so zu einer Erhöhung der Kommunikationsreichweite, der Kanalkapazität und vor allem der Störsicherheit beiträgt.

Über dieses Synergiepotenzial hinaus kann die Winkelmessfähigkeit des Ko-TAG Empfängers in Car2Car Kommunikationssystemen zur bordautonomen Bestätigung und Korrektur der Position des Kommunikationspartners genutzt werden. Diese erfolgt nach heutigem Stand der Technik durch Übermittlung von GPS Koordinaten und kann durch Störungen des GPS Kanals oder durch Fehlfunktionen der Eigenpositionsbestimmung des Kommunikationspartners leicht gestört werden. Solche Fehler der Satellitennavigation sind bei fehlender Sichtverbindung, in Tunneln, Häuserschluchten und bei Baumwuchs systemimmanent, so dass diese Problematik auch im Zuge der anstehenden Genauigkeitsverbesserung im Rahmen des Galileo-Projekts bestehen bleibt.

Beim Ko-TAG System wird der im Fahrzeug empfangene Antwortimpuls des Sendeempfängers vom Abstandsmesssystem dekodiert. Aus der gemessenen Zeit zwischen Abfrageimpuls und Antwort wird die Laufzeit des Signals bestimmt. Nach Korrektur der im Code übertragenen Dauer des aktuell in dem Sendeempfänger verwendeten Schutzintervalls lässt sich die Freiraumlafzeit in eine Information über den radialen Abstand des Sendeempfängers vom Fahrzeug umrechnen. Im Fahrzeug liegen nun als Rohdaten für eine weitere Verarbeitung vor:

- Der Azimutwinkel des Sendeempfängers vom Fahrzeug aus gesehen.
- Der radiale Abstand des Sendeempfängers vom Fahrzeug aus gesehen.
- Die Klasse des Sendeempfängers bzw. des Verkehrspartners z.B. Fußgänger, Fahrzeug, etc.
- Weitere Informationen über den Sendeempfänger bzw. den Verkehrspartner wie z.B. Masse, Bewegungszustand, Breite, Länge, etc.

Die genannten Daten werden einer Fusionseinheit zugeführt, die die Verfolgung (Tracking) der erfassten Objekte vornimmt und die gesammelten Informationen ferner mit weiteren verfügbaren Informationsquellen (z.B. Eigenfahrzeugdaten, Videobildverarbeitung, Radarsensoren, Car2Car Information) fusioniert und so ein möglichst konsistentes, detailreiches und abgesichertes Modell des Fahrumfeldes erzeugt.

Das Fahrumfeldmodell stellt die Entscheidungsgrundlage für die vorgesehenen Assistenz- und Sicherheitsfunktionen dar. Basierend auf den Informationen des Umfeldmodells werden Entscheidungen z.B. für eine Warnung des Fahrers, die Vorkonditionierung von Bremsanlagen oder die Wahl eines geeigneten Parametersatzes für die Auslösung von Schutzmaßnahmen getroffen.

### **Aktives Fußgänger- und Radfahrschutzsystem**

Aufgrund der Neuheit des Ko-TAG zugrunde liegenden Ansatzes wurden erste Grundlagen in einem Vorprojekt AMULETT gelegt, bei dem die Entwicklung eines Fußgängerschutzsystems auf Basis kooperativer Sensorik betrieben wurde. Hierfür musste zunächst eine Reihe von Basistechnologien entwickelt werden, die die Darstellung eines vollständig marktfähigen Gesamtsystems zum Fußgängerschutz aber noch nicht möglich machten.

Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen jedoch die Potenziale der Technologie, die zur Erforschung eines neuartigen Fußgängerschutzkonzeptes auf Basis kooperativer Sensorik konsequent weiter bearbeitet werden.

In dem WATCH-OVER Projekt wurden neben der Systementwicklung einer miniaturisierten kooperativen Sensoreinheit auf der Grundlage heute verfügbarer Sendeempfänger-ICs vor allem der Aspekt der Fusion der Informationen aus kooperativer Sensoreinheit und bilderkennendem System untersucht.

Das in Ko-TAG umgesetzte Fußgänger- und Radfahrschutzsystem verfolgt zunächst alle durch Sendeempfänger kenntlich gemachten Fußgänger im Erfassungsbereich des Fahrzeuges in Abstand und Winkel und hält dabei den Kontakt auch im Falle optischer Verdeckung aufrecht.

Das Tracking stützt sich neben der boardautonomen Winkel- und Abstandsmessung (Mehrfachantennensystem, Laufzeitmessung) auch auf Inertialsensorik, die im Sendeempfänger integriert ist und die Informationen über den Bewegungsvektor des Fußgängers ermittelt. Diese am Ort des Fußgängers gesammelten Informationen werden mit in das Tracking einbezogen und verbessern die Ortungsqualität weiter.

Ein weiterer Vorteil der Integration eines Inertialsensors in den Sendeempfänger liegt in der Möglichkeit der Anwendung einer energiesparenden Deaktivierung, falls er für längere Zeit (z.B. 3 Minuten) nicht bewegt wird. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der Transponder nicht mehr aktiv von einem Fußgänger getragen wird und daher nicht mehr auf Anfrageimpulse antworten muss. Als Konsequenz können Empfänger und Sender abgeschaltet werden, um den Stromverbrauch zu minimieren und die anonyme Unsichtbarkeit des Sendeempfängers z.B. in Wohnungen zu gewährleisten.

### **Rundumsicherheit für Fahrzeuge im Straßenverkehr**

Um den Nutzen des Ko-TAG Systems zu erweitern, bietet es sich an, die vor dem Fahrzeug „aufgebaute“ Schutzzone zur Detektion von Fußgängern und anderen verletzlichen Verkehrsteilnehmern auf das ganze Fahrzeug auszudehnen (360°-Sensierung), wodurch ein erheblicher Mehrwert geschaffen würde. Eine Rundumabdeckung bietet erstmals die Möglichkeit Gefahren zu erkennen, die bisherige Sensorik bislang nicht detektieren konnte.

Hierzu zählt beispielsweise ein drohender Seitencrash an einer Kreuzung oder einer nicht einsehbaren Straßeneinmündung. Hierbei kommt vor allem die Eigenschaft des Ko-TAG Systems bei der Detektierung und Verfolgung (Tracking) optisch verdeckter Objekte zur Geltung. Durch die Miteinbeziehung von Momentangeschwindigkeiten (Geschwindigkeitsprofilen) und den Dimensionen von sich bewegenden Objekten (Fahrzeugen), lassen sich mögliche Kollisionspfade berechnen. Bei einer drohenden Kollision können die Fahrzeugführer somit noch rechtzeitig gewarnt und der Unfall entweder vermieden oder aber die Unfallschwere abgemildert werden.

Potenzielle Applikationen die durch eine Rundumsensorik adressierbar sind, sind beispielsweise Frontcrash, Heckaufprall, Seitencrashes, ggf. Schleuderunfälle sowie Kreuzungs- und Abbiegeassistenzsysteme.

## **2 AP: Herausforderungen, untersuchte Methoden, Ergebnisse**

### **2.1 Gesamtsystemkonzept**

#### **2.1.1 Rahmenbedingungen**

##### 2.1.1.1 Untersuchung verfügbarer Bänder

Für eine spätere Einführung der kooperativen transponderbasierten Ortung muss ein Frequenzband gefunden werden, in dem die Systeme störungsfrei operieren können, ohne dabei andere Dienste zu beeinträchtigen. Die Abstandsmessung benötigt eine nennenswerte Bandbreite, um eine gewisse Distanzauflösung gegen Mehrwegeausbreitung umsetzen zu können. Je niedriger die Arbeitsfrequenz des Ortungssystems ist, desto besser sind die Ausbreitungseigenschaften durch Beugungseffekte bei Sichtverdeckung. Leider sind bei niedrigen Frequenzen keine Bandbreiten verfügbar, bei denen eine ausreichende Distanzauflösung erreicht werden könnte. Deshalb wurde in AMULETT und SafeTAG 1.0 das ISM-Band um 2,44 GHz, und für die zweite Baureihe SafeTAG 2.0 ein Frequenzbereich um und oberhalb von 5,8 GHz verwendet. In beiden Frequenzbereichen wurden durch Kanalmessungen typische Kanaldämpfungen untersucht, für die die neuentwickelten Systeme ausgelegt werden müssen, um bei Sichtverbindung und Sichtverdeckung eine zuverlässige Ortung von Transpondern zu ermöglichen.

##### 2.1.1.2 Konzepte für Selbsttest der Ortungseinheit

Da die transponderbasierte Ortung zur Steigerung der Verkehrssicherheit angewendet werden soll, ist es unerlässlich, die Funktionsfähigkeit eines später in Serie eingesetzten Systems durch geeignete Selbstdiagnoseroutinen prüfen zu können. Im Realbetrieb dürfen keine Fehlauflösungen durch gestörte Elektronik oder unvorhergesehene Systemzustände auftreten, da sonst im schlimmsten Fall eine Gefährdung des Straßenverkehrs durch autonom eingeleitete Fahrmanöver nicht ausgeschlossen werden kann. Deshalb müssen Störungen im Betrieb selbstständig und sicher erkannt und behoben oder das System abgeschaltet und eine Warnung über die Störung ausgegeben werden.

Während der Entwicklung der SafeTAG-Systeme wurde deshalb auch die Prüfbarkeit der Sensorik auf einwandfreie Funktion und die Fehlererkennung im Betrieb untersucht. Neben Selbsttests der einzelnen Module und dem Test der Schnittstellen zwischen diesen, welche auch bereits im Laborbetrieb und bei der Inbetriebnahme immer wieder durchgeführt wurden, wurden auch Konzepte erarbeitet, wie sich eine Ortungseinheit im Betrieb selbst abgleichen und prüfen kann.

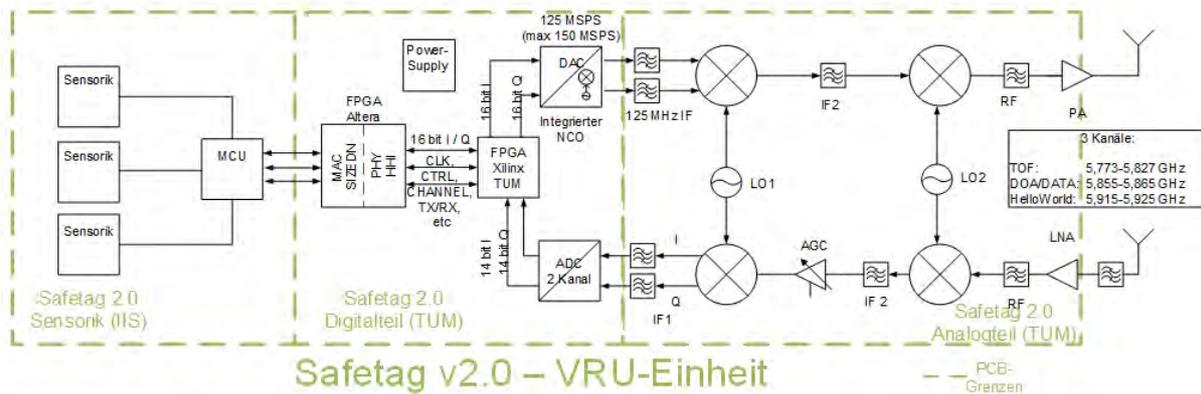
Zu diesen Konzepten zählen unter anderem Kalibriermessungen zu ortsfesten Infrastrukturtranspondern, während ein Fahrzeug an einer Ampel wartet, Tests der Sende- und Empfangszweige über Eigenempfangsmessungen und Pegelauswertungen, aber auch die Abfrage wichtiger Statussignale der einzelnen Module.

Einige der untersuchten Methoden wurden bereits in der Firmware des SafeTAG 2.0 Systems implementiert, wodurch der Betrieb bei Messkampagnen und die Fehlersuche während der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase deutlich vereinfacht wurde. Einige andere Methoden wurden dagegen nur als Konzepte betrachtet.

#### **2.1.2 Systemspezifikation**

##### 2.1.2.1 Mobile Senderempfänger

Im nachfolgenden Blockschaltbild ist der Aufbau der mobilen Senderempfängereinheit dargestellt:



**Abbildung 1: Blockschaltbild VRU Einheit**

Die Systemcharakteristiken dieser Einheit sind in dem Dokument [Systemspezifikation Ortungseinheit v2.0] im Detail spezifiziert.

Das System besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten (SafeTAG 2.0):

- Digitalteil aPHY / TOF (Spartan-6-Modul) mit ADC, DAC, CLK-Modul
- Digitalteil dPHY / Controller (Altera-Modul)
- HF-Frontend
- INS-Modul
- Supply-Modul mit Versorgungsstecker

Die SafeTAG Einheit ist in ein Aluminiumgehäuse mit Plexiglasdeckel integriert und hat die folgenden Abmessungen:

ca. 20x14x8cm (LxBxH)

Im nachfolgenden Bild ist die Einheit mit den externen Schnittstellen dargestellt



**Abbildung 2: Safetag v2.0 Frontblende mit den Anschlüssen Power (links), Antenne AUX (mitte) und Antenne MAIN (rechts), sowie Ethernet-Schnittstelle für Firmware-Update und Einstellungen**

Detailliertere Informationen zu der Sendeempfänger Einheit sind in dem [Ko-TAG Abschlussbericht CSEI] enthalten.

#### 2.1.2.2 Ortungseinheit

Die Ortungseinheit (On-Board-Unit) besteht aus folgenden Hauptelementen:

- Antenne mit 8 einzelnen Patches,
- Winkelmesssystem und Laufzeitmessungs-Einheit (TOF) zur Abstandsmessung.
- Zusätzliche ECU für das Kanalmanagement und den Datentransfer.

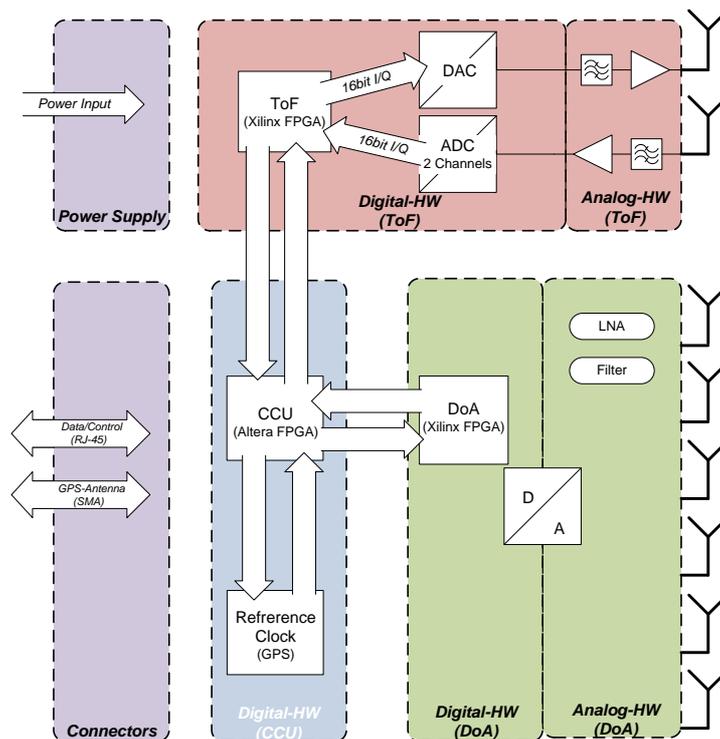


Abbildung 3: Blockschaltbild On-Board-Unit v2.0 (Quelle: sizedn)

Die wesentlichen Systemcharakteristiken sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 1: Systemeigenschaften Ko-TAG Ortungseinheit**

Messprinzip	Time of Flight und Phasenschätzung Eintreffwinkel (FB MUSIC)
Frequenzband	5,725 – 5,925 GHz
Durchschn. Sendeleistung	ca. 19 dBm
Winkelmessbereich (Azimuth)	120° (±60°)
Winkelmessgenauigkeit (Azimuth)	1-2° (Freifeld) 5° (mit signifikanten Mehrwegen)
Zielauflösung Winkelmessung (Azimuth)	<5°
Entfernungsmessbereich	bis 400m im Freifeld
Entfernungsmessgenauigkeit	0,2m (Freifeld) 1m (Verdeckungen)
Zielauflösung Entfernungsmessung	5 m
Schlechtwettertauglichkeit	IP65 (IP67 ohne Netzwerkbuchse)
<u>Zykluszeiten:</u>	
Winkelschätzungen/s gesamt:	Bis zu 50
Datenpakete/s gesamt:	200
Datenpakete/s je ST	50
TOF-Messungen/s gesamt:	1000
TOF-Messungen/s je ST:	50
Mehrzielfähig	Ja
Masse	8,1 kg (inkl. Antenneneinheit)
Abmessungen (o. Antenne)	560 x 120 x 96,5 mm (BxHxT)
Abmessungen 2D-Antenne	185 x 120 x (28,73 – 48,73) mm (BxHxT)
Abmessungen 1D-Antenne	210 x 120 x (28,73 – 48,73) mm (BxHxT)
Gehäusematerial	Aluminium (Carrier, Kühlkörper)



## Fusionseinheit

Die Fusionseinheit führt eine Zustandsschätzung von Objekten im Fahrumfeld durch. Als Eingangsdaten dienen Zustandsdaten des Ego-Fahrzeugs, Ortungs- und Beschleunigungsdaten aus dem Transponder und Daten aus der Bildverarbeitungseinheit. Diese Daten werden durch die Fusionseinheit angefordert und eine Datenassoziation durchgeführt. Ziel ist, die Daten der unterschiedlichen Sensoren zu fusionieren, um eine genauere und robustere Erfassung des Fahrumfelds zu erhalten, als dies mit einem einzelnen Sensor möglich wäre.

### 2.1.2.3.2 Spezifische Testfälle

Das Fußgängerschutzsystem wird in typischen Unfallszenarien hinsichtlich der rechtzeitigen Auslösung getestet. Während diese Anforderungen auch für andere Sensorsysteme bestehen, wird für das kooperative Sensorsystem die Absicherung in drei spezifischen Testfällen (Sondersituationen) gefordert.

1. Ein SafeTAG, welches vor ein fahrendes Fahrzeug geworfen wird, darf zu keiner Falschauslösung des Schutzsystems führen. Um diese Situation zu erkennen, sind Beschleunigungssensoren in das SafeTAG integriert, welche die Wurfsituation und die damit verbundene „free-fall“-Phase erkennen.
2. Ein Fußgänger mit SafeTAG, der sich auf einer Brücke befindet, darf bei einem unter der Brücke hindurch fahrenden Fahrzeug keine Systemaktion auslösen. Dazu ist eine Elevationsindikation notwendig, welche durch eine entsprechende vertikale Anordnung von Antennenelementen erreicht wird.
3. SafeTAGs an Fahrzeugpassagieren können zu einer falschen Typ-Klassifikation der Verkehrsteilnehmer führen, wenn vom SafeTAG der Typ Fußgänger übertragen wird, es sich aber um die Klasse Fahrzeug handelt. Um mit dieser Sondersituation umgehen zu können, wird ebenfalls eine Erkennung durch die Beschleunigungssensoren im Tag gefordert.

### 2.1.2.3.3 Integration in ein zukünftiges Seriensystem

In einem Seriensystem ist die kooperative Sensorik als ein Block zu sehen, der sich mit seinen Schnittstellen in das Gesamtsystem einfügt. Dieses Gesamtsystem besteht aus verschiedenen Schichten. In der untersten Schicht findet in der „Lokalen Perzeption“ die Fusion aus fahrzeuglokalen Sensoren und der kooperativen Sensorik statt. Diese generische Fusion ist auf einheitliche Schnittstellen, die von den Sensoren bereitgestellt werden, angewiesen. Die Schnittstellen leiten sich aus einem sogenannten Fahrumfeldmodell (engl. vehicle environment model VEM) ab. Daraus entsteht die Bedingung, dass das kooperative Sensorsystem, die VEM-Schnittstellen des jeweiligen Fahrzeugherstellers bedienen kann.

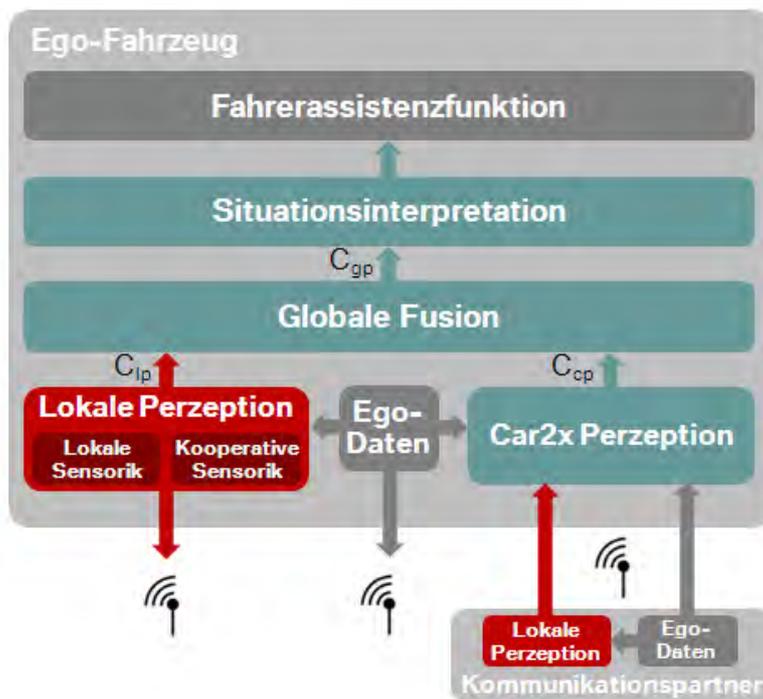


Abbildung 5: Integration der kooperativen Sensorik in das Gesamtsystem

#### 2.1.2.4 Rundumsicherheit

##### 2.1.2.4.1 Anforderungsanalyse Schutzsystem für Rundumsicherheit (RUS)

Der Name Rundumsicherheit impliziert eine 360° umfassende Sicherheitszone rund um ein Fahrzeug. Diese 360°-Abdeckung kann dadurch erreicht werden, in dem ein Fahrzeug fortwährend aktiv die gesamte Umgebung scannt. Das Ergebnis ist eine lückenlose Erfassung der Umgebung und das System ist dadurch prinzipiell in der Lage alle vorstellbaren Arten von Kollisionen zu adressieren, wie beispielsweise zwei Fahrzeuge die beim Rückwärtsausparken auf Kollisionskurs sind.

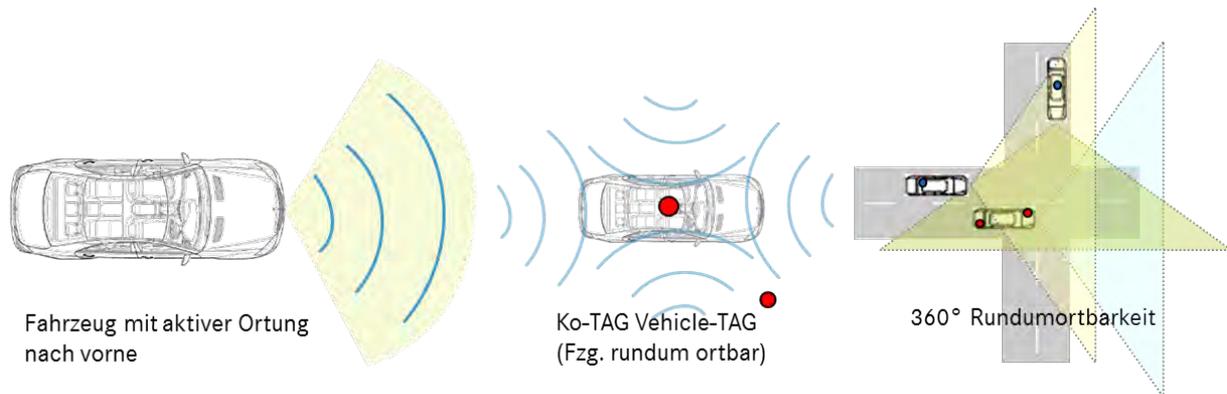


Abbildung 6: Systemansatz aktive 360° Rundumortung

Ein Nachteil dieser Systemauslegung besteht darin, dass es sehr schnell zu hohem Datenaufkommen kommen kann. Schon bei geringer Verkehrsdichte steigt durch das aktive Scannen in alle Richtungen die Systemlast schnell an, insbesondere wenn sich auch noch Fußgängertags in Ortungreichweite befinden. Der gravierendste Punkt aber ist der erforderliche HW und Integrationsaufwand für dieses Setup. Die Ko-TAG Ortungseinheit verwendet ein Antennenarray ein, welches einen systembedingten Öffnungswinkel von max. +/-60° aufweist. Um eine Rundumortung zu ermöglichen, müssten demnach 3 solcher Antennenarrays mit nachgeschalteter Auswerte- und Verarbeitungslogik verwendet werden. Dies würde zu

einer extrem hohen HW- Komplexität mit entsprechend hohen Kosten, hohem Integrationsaufwand und einer aufwändigen Software Datenverarbeitung führen.

Eine 360°-Schutzzone kann u.U. aber auch dann realisiert werden, wenn sichergestellt wird, dass ein mit einer Ko-TAG Ortungseinheit ausgerüstetes Fahrzeug zwar selber (aktiv) nur nach „vorne“ orten kann (dort, wo in der Regel die meiste Gefahr droht), dabei aber Fahrzeuge, die mit einem Ko-TAG Vehicle-TAG ausgerüstet sind, von allen Seiten (also rundum) orten kann. Das hat zur Folge, dass nicht alle Unfallszenarien adressiert werden können, wie im voran zitierten Beispiel zweier rückwärts ausparkender Autos.



**Abbildung 7: Systemansatz passive 360° Rundumortbarkeit**

Auch kommen in der Praxis Konstellationen vor, wo sich kollisionsgefährdete Fahrzeuge nicht gegenseitig sehen, sondern ggf. nur ein Fahrzeug das andere detektieren kann, wie in Abbildung 7 rechts dargestellt. In diesem Beispiel könnte nur das von oben nach unten fahrende Fahrzeug eine drohende Kollision detektieren. Dies bedingt, dass in bestimmten Szenarien nur das aktiv ortende Fahrzeug in der Lage ist, Handlungen zur Kollisionsvermeidung bzw. Kollisionsfolgenminderung einzuleiten. Auf der anderen Seite bietet die passive Ortbarkeit den großen Vorteil, dass für das Fußgängerschutzsystem der Partner BMW und Conti und für das RUS- Schutzsystem dasselbe HW-Setup zum Einsatz kommt. Beide Schutzsysteme basieren auf derselben Hardware und unterscheiden sich nur in der Safe-TAG Firmware, Systemkonfiguration und Anwendung. Integrationsaufwand und Kosten für beide Schutzsysteme sind nahezu identisch und der erzielbare Mehrwert und Nutzen wird maximiert.

Deshalb wurde für die weiteren Untersuchungen für RUS der Systemansatz der „360° - Rundumortbarkeit“ gewählt.

#### 2.1.2.4.2 Durch RUS adressierbare Unfalltypen

Zur Validierung des gewählten Systemansatzes gilt es die dadurch adressierbaren und nicht adressierbaren Unfallszenen zu untersuchen und zu bewerten. Auf Unfälle im Kreuzungsbereich (querender Verkehr) entfallen ca. 18 Prozent der Verkehrstoten und ca. 37 Prozent aller Unfälle mit Personenschaden.

Es wurde eine GIDAS-Datenbank-Auswertung für alle Kollisionen im querenden Verkehr zwischen Pkw, Nutzfahrzeugen und Bussen durchgeführt, wobei nur die primären Kollisionen betrachtet wurden. Unter querendem Verkehr wurde ein Pkw//NFz/Bus verstanden, das unter einem Winkel von  $90^\circ \pm 20^\circ$  mit der Fahrzeuglängsachse seines Kontrahenten kollidierte. Hierbei stellte sich heraus, dass RUS 9,2% aller erfassten Unfälle – inkl. Unfälle im Längsverkehr – adressiert.

## Einschränkung auf querende Fahrzeuge (Pkw, NFz, Bus)

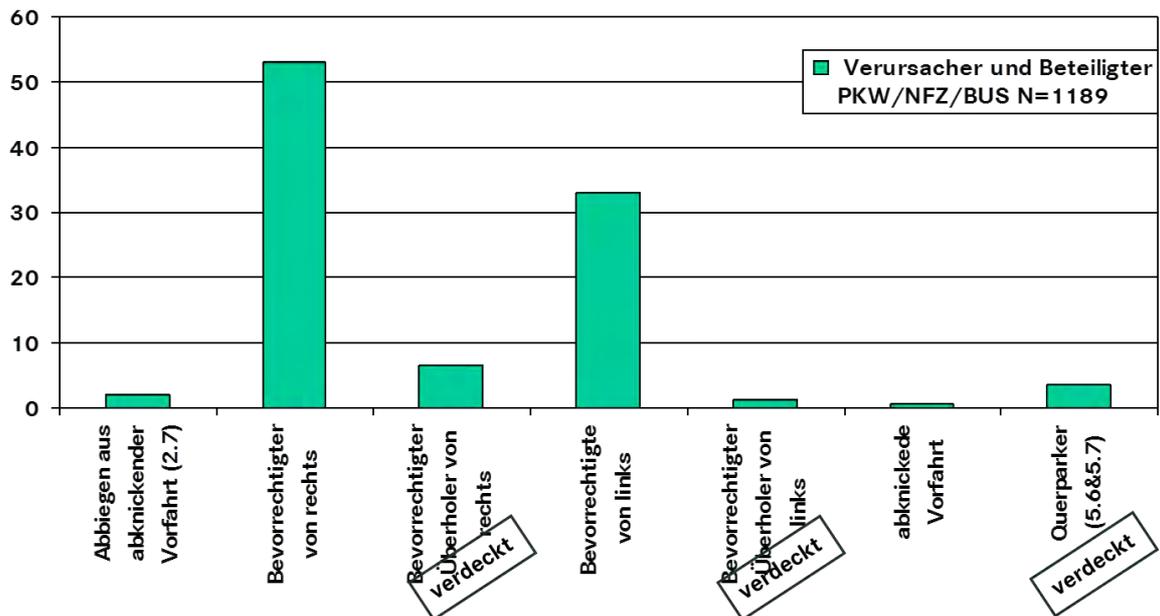
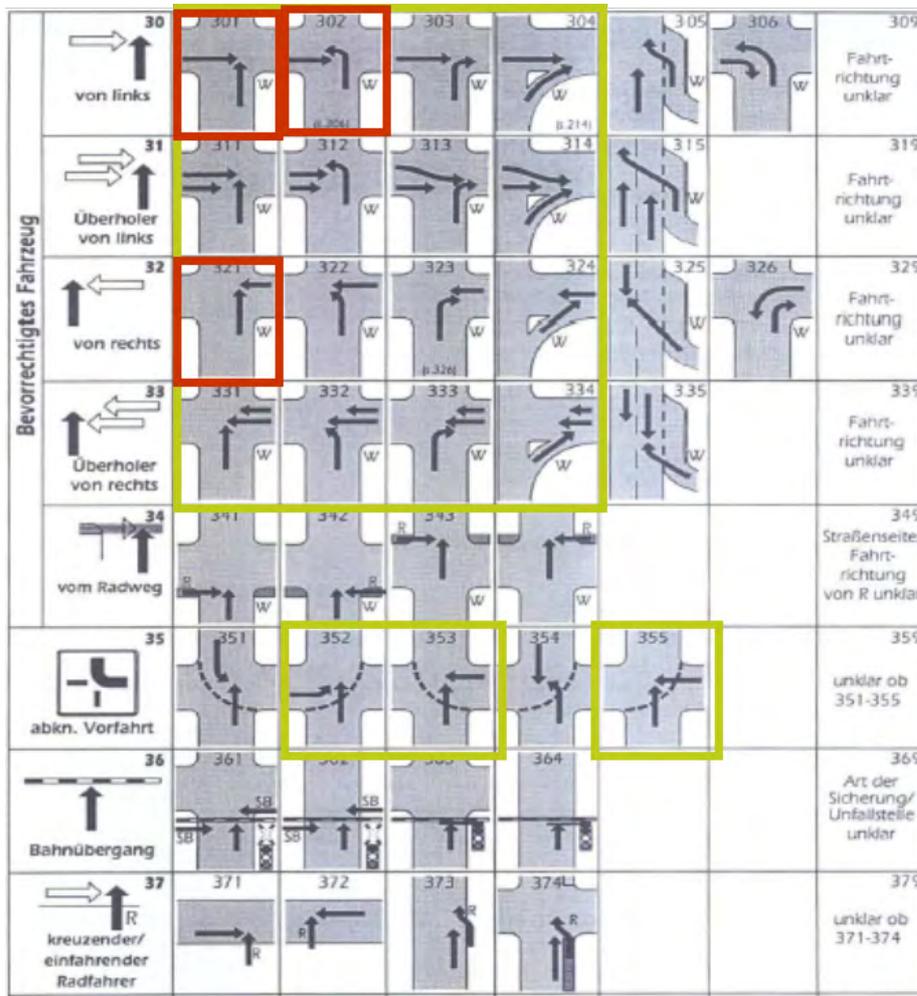


Abbildung 8: Durch RUS adressierbare Unfalltypen

Die Unfälle im querenden Verkehr selbst teilen sich wie oben dargestellt auf. Szenen in denen optische Verdeckung herrschte, sind explizit gekennzeichnet. Der Großteil aller Unfälle im querenden Verkehr liegt aber beim klassischen Abbiegen mit Vorfahrtsmissachtung.

### 2.1.2.4.3 Ableitung relevanter Unfallszenarien anhand von Unfallstatistiken

Die Festlegung beim Systemansatz auf „passive Rundumortbarkeit“ führt zwangsläufig dazu, dass nicht alle vorkommenden Unfalltypen im querenden Verkehr adressiert werden können (Z.B. wenn zwei Fahrzeuge rückwärts kollidieren). Deshalb wurde anhand einer weiteren Unfalldatenanalyse die häufigsten Typ 3 - Unfälle (Einbiegen/Kreuzen-Unfall) detailliert betrachtet.



**Abbildung 9: Auswertung Unfalldatenanalyse Typ 3**

Die Untersuchungen ergaben, dass durch den gewählten Systemansatz alle Typ 3 – Unfälle adressiert werden können. Der Ansatz der 360°-Ortbarkeit ist somit gerechtfertigt. Außerdem bilden die Unfalltypen 301, 302 und 321 (in der Grafik rot dargestellt) mehr als 50% der von adressierten Einbiegen/Kreuzen-Unfälle ab. Deshalb wurden diese drei Unfallszenarien als Basis für die Systemauslegung des Schutzsystems für RUS ausgewählt und das Schutzsystem RUS anhand der „Beherrschung“ dieser Szenarien validiert.

#### 2.1.2.4.4 Spezifikation System Rundumsicherheit (RUS)

Die Ergebnisse aus Anforderungs- und Unfalldatenanalyse fließen allesamt in einen ersten Systementwurf (Spezifikation) für das Schutzsystem RUS ein.

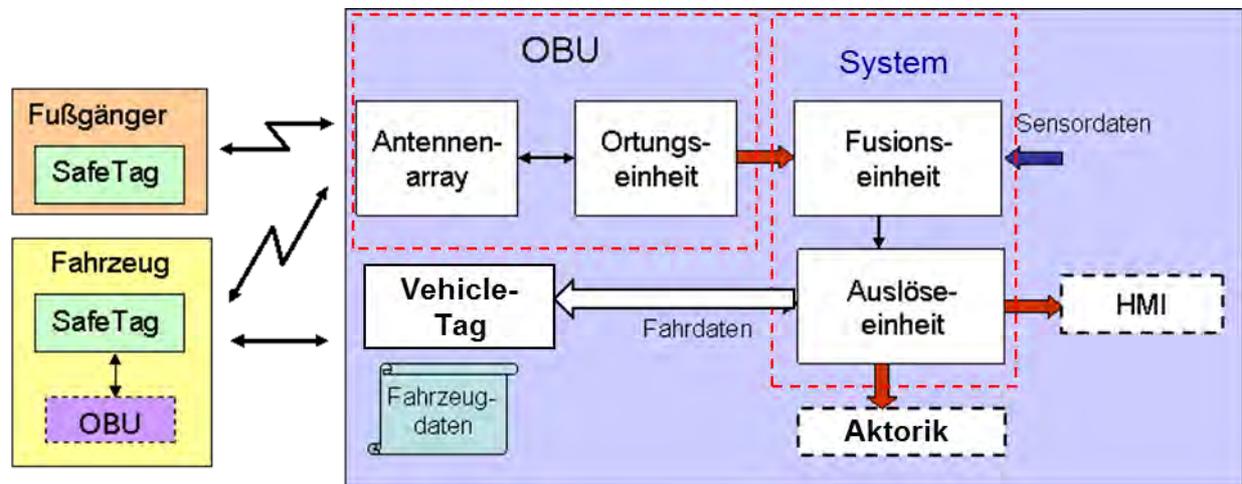


Abbildung 10: Blockdiagramm System RUS

Der mit „OBU“ (Onboard Unit) bezeichnete Block stellt das Ko-TAG Ortungssystem, bestehend aus Ortungseinheit und Antennenarray dar. Diese liefert die Objektdaten (Datagramme), Abstände und Winkel zu allen georteten Vehicle-TAGs an die Fusionseinheit.

In der Fusionseinheit laufen die Ortungsdaten der OBU und die Sensordaten (CAN-Bus) des Ego-Fahrzeugs zusammen. Hier werden alle georteten Objekte (Fahrzeug-TAGs) verwaltet. Auch das Tracking von Objekten erfolgt durch die Fusionseinheit.

Die Auslöseeinheit berechnet mögliche Kollisionspfade des eigenen Fahrzeugs mit georteten Fahrzeugen und bestimmt das Kollisionsrisiko. Bei entsprechender Gefährdung werden geeignete Schutzmaßnahmen getriggert. Diese können das HMI oder die Fahrzeugaktorik betreffen.

Über das HMI können audio-visuelle Warnungen ausgegeben werden. Über die Aktorik können haptische Signale (z.B. Gurtstraffer) oder Eingriffe in die Fahrzeugdynamik (bremsen) ausgelöst werden.

Über die Komponente „Vehicle-Tag“ wiederum werden die dynamischen Daten des Egofahrzeugs in das Ego-Fahrzeug-TAG geschrieben und stehen dadurch OBUs anderer Fahrzeuge zur Verfügung. (Eine OBU ortet Vehicle-TAGs von „Fremdfahrzeugen“ und liest deren Daten aus.)

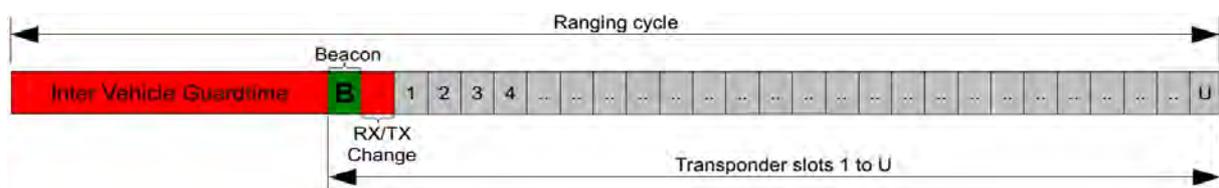
### 2.1.3 Protokollspezifikation

#### 2.1.3.1 Konzept Physikalische Übertragung

In den prototypischen Ortungssystemen der SafeTAG 1.0 und 2.0-Reihe wurde als Abstandsmesscode eine Maximallängen-Sequenz (kurz: M-Sequenz) der Länge 255 Bit verwendet. Diese 2-wertige Sequenz wird als Modulationssignal für eine Amplitudenmodulation verwendet, bei der der Wert „1“ der vollen Send-/Empfangsleistung entspricht, während bei „0“ kein Signal gesendet wird. Ein entscheidender Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich die Amplitudenmodulation sehr einfach in analoger Hardware erzeugen und auswerten lässt. Hierdurch können sich Vorteile in Bezug auf Baugröße und Kosten der Transponder ergeben, da die Modulation und Demodulation in analoger Hardware realisiert werden kann. Die Wahl dieser Modulationsart und der genannten Sequenz hat aber auch Auswirkungen auf die erzielbare Performance und kann zu Einschränkungen bei der Abstandsschätzung führen. So kann zum Beispiel gezeigt werden, dass aufgrund der Autokorrelationseigenschaften

der M-Sequenz eine von der Codelänge abhängige Beschränkung des Dynamikbereichs resultiert. Neben der genannten M-Sequenz wurden deshalb auch verschiedene andere Sequenzen sowie weitere Modulationsarten untersucht.

Die Rücksendung des Ortungssignals von den Transpondereinheiten erfolgt in vorher zugeordneten, individuellen Zeitschlitzen. Hierzu wurde eine Aufteilung wie in Abbildung 11 zu sehen umgesetzt. Zu Beginn befindet sich ein kurzes reserviertes Zeitintervall, das für die Umschaltung der Hardware, und das Einschwingen der analogen Bauelemente benötigt wird. Im Anschluss hieran wird von der Ortungseinheit der Abstandsmesscode („Beacon“) ausgesendet. Sobald dies geschehen ist, wird in der Ortungseinheit der Empfangszweig aktiviert, und die für den Sendebetrieb genutzten Komponenten deaktiviert. Nach jedem Beacon folgt dann eine vordefinierte Anzahl von getrennten Zeitslots, in denen jeweils eine Transpondereinheit auf das empfangene Beacon antworten kann. Jedes Beacon enthält an seinem Beginn zusätzlich eine Präambel, welche dazu dient, der automatischen Verstärkungsregelung im Empfänger genügend Zeit zu geben um je nach empfangener Leistung die passende Einstellung für die variablen Verstärker zu wählen.



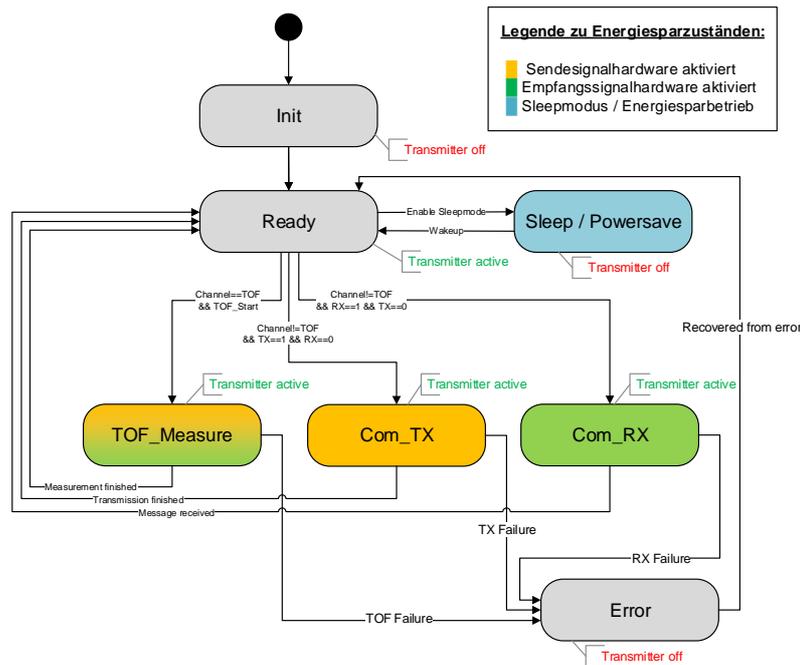
**Abbildung 11: Zeitraster im Kanal der Abstandsmessung**

### 2.1.3.2 Energiemanagement

Für eine flächendeckende Einführung der im Projekt Ko-TAG entwickelten Ortungstechnologie müssen die Transponder nicht nur klein und leicht, sondern auch stromsparend sein, um die Akzeptanz der Nutzer nicht durch häufige Batteriewechsel oder notwendige Aufladevorgänge zu beeinträchtigen.

Die im Projekt entwickelten Prototypen erfüllen die Anforderungen an ein marktreifes System in dieser Beziehung noch nicht, da bei der Entwicklung vorrangig auf einen modularen und flexiblen Aufbau, einfache Testbarkeit, und gute Zugänglichkeit der Komponenten geachtet wurde. Um den Entwicklungsaufwand in Grenzen zu halten, wurde zudem ein symmetrisches Hardwaredesign für die sowohl in Transpondern als auch Ortungseinheiten eingesetzten Module umgesetzt. Dadurch ergeben sich allerdings Nachteile für den Stromverbrauch der Transponder, da diese Rechenleistung vorhalten, die von ihnen gar nicht benötigt wird.

Dennoch wurde das Thema Energieversorgung und –management während des Projekts nicht vernachlässigt sondern war ein sehr wichtiger Aspekt in der Konzeption der Systems und der Entwicklung. Insbesondere das für das SafeTAG-System entwickelte Zeitschlitzverfahren erlaubt sehr gute Möglichkeiten, im Betrieb verschiedene Komponenten abzuschalten und damit die Leistungsaufnahme der Transponder deutlich zu reduzieren.



**Abbildung 12: Energiesparzustände im Prototypensystem**

### 2.1.3.3 Konzept Medium Access Control

Eine der Hauptaufgabe des Teams des SIZEDN innerhalb des Projektes Ko-TAG bestand in dem Aufbau eines dynamischen und skalierbaren Funknetzwerks. Die folgenden Unterabschnitte geben einen Einblick in die Entwicklung des entstandenen Funkprotokolls.

#### 2.1.3.3.1 Netzwerkkomponenten

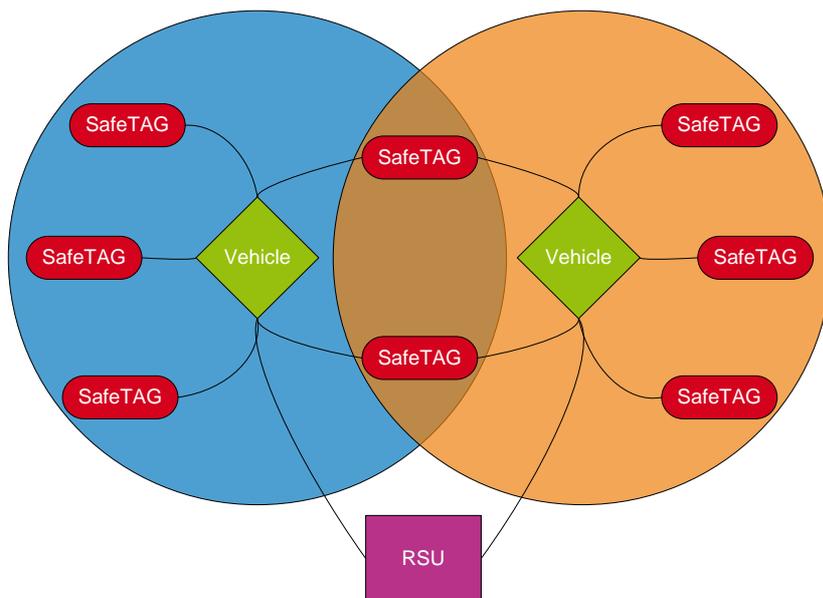
Ein Ko-TAG Netzwerk besteht auf der höchsten Klassifizierungsebene aus zwei Komponenten, den Devices, welche durch Safe-TAGs (ST) repräsentiert werden und den Koordinatoren, repräsentiert durch die On Board Units (OBU). Durch diese Aufteilung entsteht so eine Master/Slave-Hierarchie, in der Koordinatoren als Master fungieren.

#### 2.1.3.3.2 Netzwerkstruktur

Die innerhalb des Projektes definierte Netzwerkstruktur wird aufgebaut durch mehrere einzelne Sternstrukturen, die sich überlagern können, aber nicht untereinander verbunden sind. Somit lässt die Struktur keine Kommunikationen zu, die über die Grenzen eines einzelnen Sternes hinausgehen. In einer Sternstruktur erfolgt ein Verbindungsaufbau zwischen einem zentralen Koordinator und einem oder mehreren Devices.

Ein Stern existiert aus genau einem Koordinator und mindestens einem Device. Eine Funkverbindung unter Koordinatoren, sowie unter Devices ist nicht möglich. Allerdings kann ein Device gleichzeitig mit mehreren Sternen (und somit auch mit mehreren Koordinatoren) verbunden sein. Ein Netz mit einem Koordinator wird als Subnetz (SN) bezeichnet. Der Zusammenschluss mehrerer SN wird als Globales Netz (GN) betrachtet.

Ein Beispiel eines Netzwerkes der in dem Projekt definierten Netzwerkstruktur ist in Abbildung 13 gezeigt.



**Abbildung 13: Ko-TAG Netzwerkstruktur**

### 2.1.3.3.3 Aufbau des Kanal- und Kommunikationsmodelles

Die grundlegenden Prinzipien der Kommunikation und der Kanalnutzung basieren auf einer Kombination aus wettbewerbsbehafteten Kanalzugriff und einem Zeitmultiplexing Verfahren. Ebenso wird ein Kanalmultiplexing auf den in Abbildung 14 beschriebenen drei Kanälen betrieben.

**Tabelle 2: Verwendete Funkkanäle der PHY-Schicht**

Name	Beschreibung	Frequenz	Bandbreite	Datenrate
<i>Steuerkanal</i>	Legt den gewählten Steuerkanal im 5,9 GHz Band fest	5,920 GHz	10MHz	6 MBit/s
<i>Datenkanal</i>	Legt den gewählten Datenkanal im 5,9 GHz Band fest.	5,860 GHz	10MHz	6 MBit/s
<i>Rangingkanal</i>	Legt den gewählten Ranging-Kanal im 5,9 GHz Band fest	5,800 GHz	50MHz	-----

Durch das Kanalmultiplexing und die Aufteilung der einzelnen Aufgaben auf je einen separaten Kanal ist es möglich, die Kanalzugriffsmechanismen auf die Anforderungen der jeweiligen Aufgabe anzupassen.

#### 2.1.3.3.3.1 Zeitmultiplexing und Superframes

Um eine genaue Messung hinsichtlich der TOF Berechnung zu ermöglichen und das Trigger-Signal für die Winkelschätzung zeitgerecht zu generieren, muss die Dauer einer Datenübertragung deterministisch sein. Aus diesem Grund wird ein exklusives Zeitmultiplexing verwendet. Dabei wird bei der Anmeldung eines Knotens in einem SN dem Knoten eine Kombination von Parametern mitgeteilt, durch die eindeutig sichergestellt ist, wann ein Knoten senden darf und wann er empfangsbereit sein muss. Diese Konfiguration kann jederzeit durch den Koordinator geändert werden, um zum Beispiel einen Knoten durch die Zuteilung eines exklusiven Zeitschlitzes zu priorisieren (s. Kapitel 2.1.3.3.3.2).

Ein einzelner Zeitschlitz kann noch weiter aufgeteilt werden, indem dieser mehreren Knoten abwechselnd zur Verfügung gestellt wird. Eine eindeutige Identifizierung kann dann stattfin-

den, indem den einzelnen Knoten Superframe-Zyklen zugewiesen werden (s. Kapitel 2.1.3.3.3.2). Für das Zeitmultiplexing werden sogenannte Superframes verwendet. Superframes werden durch ein TOF-Beacon eingeleitet, das zur Synchronisation zwischen dem Koordinator und den Devices dient. .

#### 2.1.3.3.3.2 Superframe Multiplexing

Einzelne Zeitschlitz können aus Sicht des Koordinators weiter aufgeteilt werden. Einem Slot können mehrere Devices zugeteilt werden. Die Unterscheidung der Devices erfolgt dann in diesem Fall nicht nur anhand des aktuellen Zeitschlitzes, sondern zusätzlich durch die Zyklusanzahl des aktuellen Superframes. Dabei wird bei jedem Superframedurchlauf die aktuelle Zyklusanzahl erhöht. Dies ermöglicht es eine größere Anzahl von Devices innerhalb eines SN zu verwalten. Durch die Vergabe exklusiver Zeitschlitz an bestimmte Devices wird hier auch die Möglichkeit einer Priorisierung gegeben. Abbildung 14 zeigt eine Beispielkonfiguration von drei aufeinander folgenden Übertragungen im gleichen SN. In denselben Zeitschlitz werden zu unterschiedlichen Zyklen verschiedene Devices angesprochen.

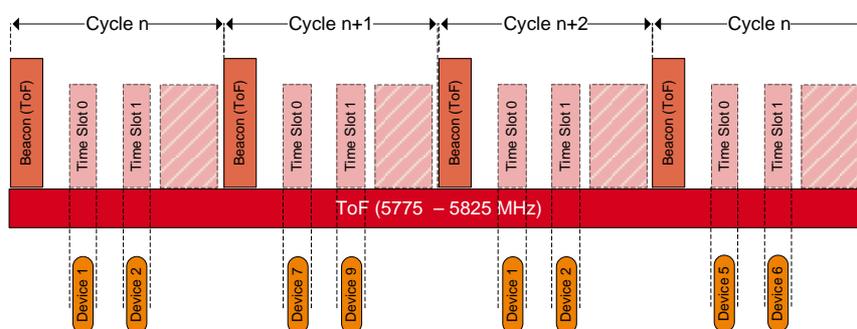


Abbildung 14: Zeitschlitzkonfiguration eines Subnetzes

Hierdurch soll ermöglicht werden, sowohl Szenarien abzudecken, in welchen sehr viele Devices gleichzeitig angemeldet sind bei gleichzeitig geringer relativer Geschwindigkeit und Updaterate (Innenstadtbereich), sowie wenige Devices, die aufgrund der hohen Geschwindigkeit Außerorts in jedem Zyklus abzufragen sind.

#### 2.1.3.3.3.3 Zyklus

##### 2.1.3.3.3.3.1 Allgemein

Wie bereits in Kapitel 2.1.3.3.3.2 erwähnt, macht das Protokoll Gebrauch von sogenannten Zyklen. Ein Zyklus wird hier definiert, durch einen kompletten erfolgreichen Durchlauf aller in Kapitel 2.1.3.3.3.8 beschriebenen Kommunikationsphasen.

##### 2.1.3.3.3.3.2 Zyklusidentifikation

Ein Koordinator verfügt über eine fest definierte Anzahl an Zyklen, die jeweils eine eigene Konfiguration hinsichtlich der Belegung der verfügbaren Zeitschlitz besitzen. Um die Zyklen zu unterscheiden und damit sich STs in das entsprechende Raster einordnen können verfügt jeder Zyklus über eine exklusive interne ID.

##### 2.1.3.3.3.3.3 Priorisierung

Durch die Unterteilung der Kommunikationsvorgänge in mehrere Zyklen, ist die Möglichkeit der Priorisierung von STs gegeben, indem ein ST mehreren Zyklen zugewiesen wird.

##### 2.1.3.3.3.4 Aufbau der Superframes

Das Ko-TAG Protokoll verwendet insgesamt drei verschiedene Arten von Superframes, wobei jeder Kanal seinen eigenen Typ verwendet. Somit ergeben sich

- ein TOF Superframe (s. Kapitel 2.1.3.3.3.5)

- ein AOA Superframe (s. Kapitel 2.1.3.3.3.6)
- und ein Superframe für den Steuerkanal (s. Kapitel 2.1.3.3.3.7)

wobei diese hier chronologisch aufgelistet sind. Alle Typen der *Superframes* besitzen dieselbe zeitliche Länge. Das Durchlaufen verschiedener Superframes vom einem TOF Superframe bis zum nächsten TOF Superframe wird als Zyklus bezeichnet.

#### 2.1.3.3.3.5 Aufbau des TOF Superframes

Der Aufbau eines TOF Superframes ist in Abbildung 8 gegeben. Der Superframe wird durch ein Beacon eingeleitet, welches gleichzeitig zur Synchronisation und als Trigger für eine Abstandsmessung der angesprochenen Devices dient. Beim Empfang eines Beacons ermitteln die Devices anhand dessen Zusatzinformationen, ob sie für den folgenden Superframe zugeteilt sind, Ist dies der Fall, antworten sie in ihrem fest definierten Zeitschlitz auf die eingegangene Anfrage.

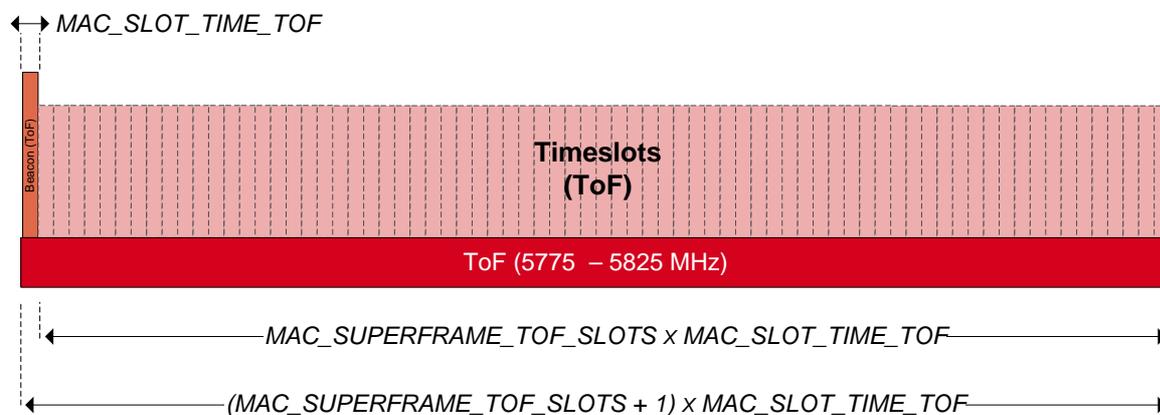
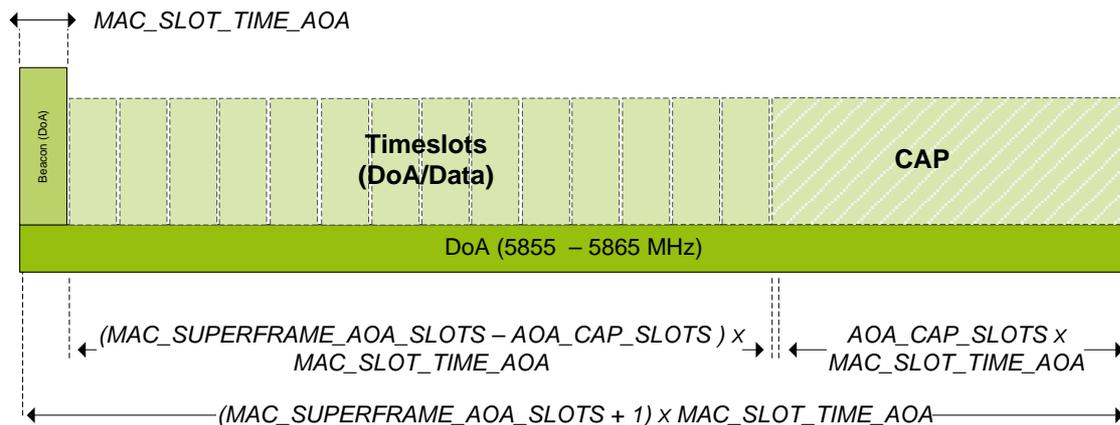


Abbildung 15: Aufbau eines TOF Superframes

Die Beacons, die einen TOF Superframe einleiten beinhalten als Daten die Adresse des Koordinators. Anhand dieser Adresse können die Devices eine Zuordnung innerhalb Ihrer internen Verbindungstabelle durchführen.

#### 2.1.3.3.3.6 Aufbau des AOA Superframes

Der Aufbau des AOA Superframes ähnelt sehr stark dem TOF Superframe. Der Unterschied zwischen den beiden liegt zum einen in der Länge und Anzahl der einzelnen Slots, sowie im Typ, der Länge und Informationsgehalt des einleitenden Beacons. Zusätzlich enthält der AOA Superframe am Ende gegebenenfalls (je nach Konfiguration des *Superframes*) eine Contention Access Period (CAP), in welcher alle, im Beacon genannten Geräte teilnehmen dürfen. Abbildung 16 zeigt eine solchen AOA Superframe.



**Abbildung 16: Aufbau eines AOA Superframes**

Das AOA Beacon enthält folgende Metainformationen

- den Zyklus des aktuellen *Superframes* und
- die Konfiguration des folgenden AOA *Superframes*.

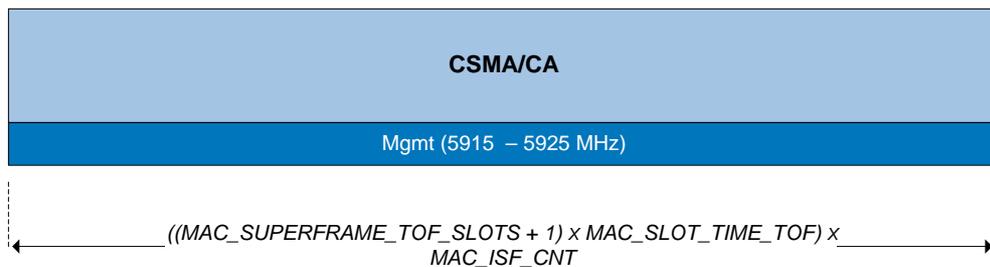
Die Konfiguration des AOA *Superframes* beschreibt, welche Geräte an der Kommunikation teilnehmen sollen und welchen Zeitschlitz sie dafür zugeteilt bekommen. Dabei können allerdings nur Geräte teilnehmen, die ebenfalls im vorhergegangenen TOF Superframe aktiv waren. Diese Geräte werden durch die Nummer ihres Zeitschlitzes im aktuellen Zyklus angesprochen, wobei die Reihenfolge dem jeweiligen zugeordneten Zeitschlitz entspricht. Abbildung 17 zeigt einen Beispielaufbau eines AOA Beacons für einen AOA Superframe der Länge sieben. Die ersten fünf Zeitschlitzes des Superframes werden fest bestimmten Devices zugeordnet. Die Zeitschlitzes fünf und sechs enthalten eine allgemeine Adresse, wodurch die CAP eingeleitet wird.

Cycle	Slot 0	Slot 1	Slot 2	Slot 3	Slot 4	CAP
Cycle Nr.	Device 08	Device 36	Device 17	Device 15	Device 01	MAC_CAP_ADDR

**Abbildung 17: Beispiel eines AOA Beacons**

#### 2.1.3.3.3.7 Aufbau des Superframes im Steuerkanal

Der Superframe im Steuerkanal entspricht einer einzigen großen CAP und es werden keine exklusiven Zeitschlitzes vergeben. Der Superframe des Steuerkanals ist der einzige mit einer variablen Länge, welche allerdings ein Vielfaches der Länge eines TOF (und somit auch AOA) Superframes darstellen muss. Ein Beacon existiert hier nicht. Der Aufbau des Superframes ist in Abbildung 18 dargestellt.

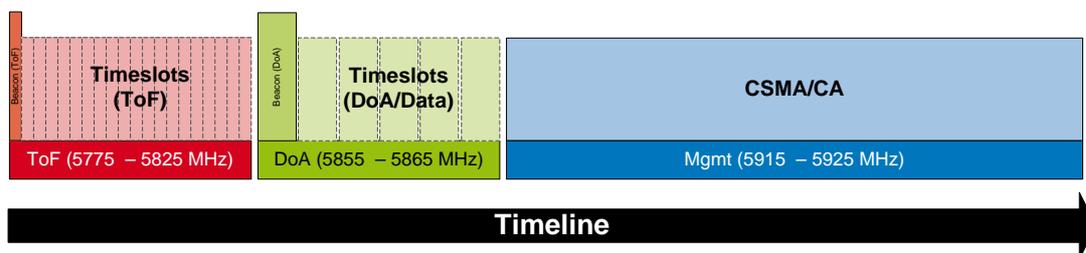


**Abbildung 18: Aufbau eines Superframes im Steuerkanal**

### 2.1.3.3.3.8 Kommunikationsphasen der Koordinatoren

#### 2.1.3.3.3.8.1 Ablauf der Superframes innerhalb eines Koordinators

Ein Koordinator durchläuft innerhalb eines Zyklus mehrere Phasen, die durch die in den Kapitel 2.1.3.3.3.4 beschriebenen Superframes definiert sind. Abbildung 19 zeigt den zeitlichen Ablauf der einzelnen Superframes innerhalb eines Zyklus eines einzelnen Koordinators. Eine detaillierte Beschreibung der Phasen geben die Kapitel 2.1.3.3.3.8.2 - 2.1.3.3.3.8.4.



**Abbildung 19: Superframe Durchlauf eines Koordinators**

#### 2.1.3.3.3.8.2 TOF-Phase

In der ersten Phase des Kommunikationsablaufs finden die TOF Berechnungen unter der Verwendung der in Kapitel 2.1.3.3.3.5 definierten Superframes statt. Das Beacon zu Beginn des Superframes dient der Synchronisierung der einzelnen Devices auf die Zeitquelle des aktuellen Koordinators. Im SN ist eindeutig definiert, welche Devices durch den folgenden Superframe angesprochen werden und dementsprechend in ihren zugeteilten Zeitschlitzen antworten müssen.

#### 2.1.3.3.3.8.3 Daten-/AOA-Phase

Die Daten-/AOA-Phase folgt direkt auf die TOF Phase. In dieser Zeit können jegliche Kommunikationen stattfinden, bis auf das Versenden und Behandeln von Announcements. Es werden keine Verbindungsversuche angenommen, bereits verbundene Devices können sich allerdings von dem aktiven Koordinator abmelden und umgekehrt. Für eine Datenübertragung, die von einem Device an einen Koordinator gerichtet ist, findet beim Koordinator parallel zu jeder Übertragung eine Winkelberechnung statt. Ob für das jeweilige Device eine Winkelmessung erforderlich ist, gibt der Koordinator vor.

Die Devices, die in dieser Phase aktiv am Kommunikationsprozess teilnehmen dürfen und sollen, werden durch die jeweiligen Felder im Beacon des Datenkanals definiert (s. Kapitel 2.1.3.3.3.6). Devices, die nicht eingeteilt sind, können sich schlafen legen oder in den Steuerkanal wechseln.

#### 2.1.3.3.3.8.4 Steuerphase

Die letzte Phase stellt die Steuerphase dar. In dieser wechselt ein Koordinator auf den Steuerkanal, und hört diesen nach Announcements bisher unbekannter Devices ab. Devices verwenden diese Phase dazu, um ihre eigenen Announcements zu senden und eventuelle Antworten unbekannter Koordinatoren zu empfangen. Nach einem erfolgreichen Austausch von Announcements können auf diesem Kanal Verbindungsversuche initiiert werden.

### 2.1.3.3.3.9 Kommunikationsphasen der Devices

Der Ablauf der einzelnen Kommunikationsphasen der *Devices* folgt einem Schema, sehr ähnlich zu denen der Koordinatoren. Allerdings sind hier die Sprünge auf den physikalischen Kanälen nicht ganz so gleichmäßig strukturiert sondern dynamischer, jeweils an die momentane Konfiguration angepasst.

Der interne Ablauf eines *Devices* kann durch einen einzigen langen Superframe, eine sogenannte Slot-Matrix beschrieben werden. Diese Slot-Matrix beschreibt für jeden möglichen Slot eine entsprechende Aktion, die zu diesem Zeitpunkt ausgeführt werden muss. Diese Matrix wird bei der Anmeldung bei einem Koordinator entsprechend abgeändert, so dass die benötigten Aktionen (Beacon, Antwort, ...) zu den zugewiesenen Zeitpunkten erfolgen kann.

Der Kommunikationsablauf der *Devices* wird anhand von Abbildung 20 verdeutlicht.

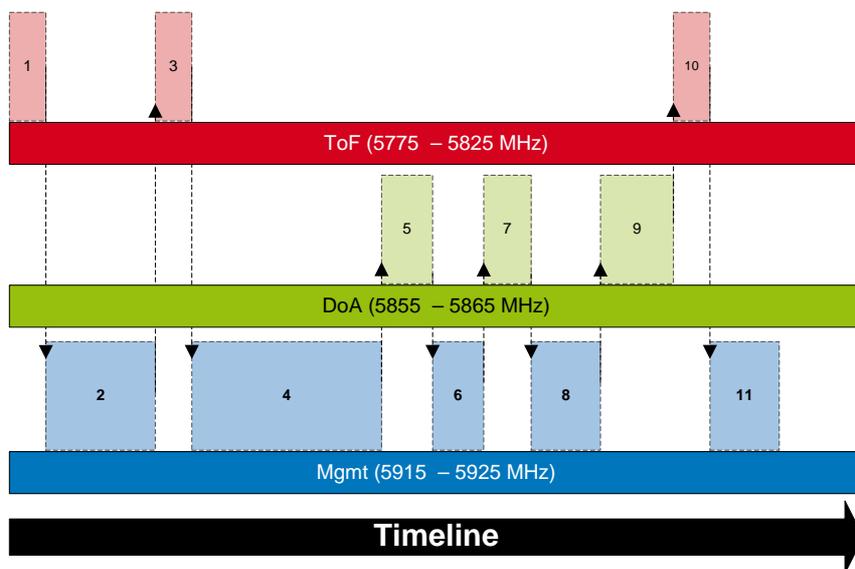


Abbildung 20: Kommunikationsablauf bei Devices

Tabelle 3: Beschreibung zum Kommunikationsablauf von Devices

Index	aktueller Kanal	Beschreibung
1	TOF Kanal	Beginnt ein neuer Superframe, so schaltet das Device auf den TOF Kanal und hört diesen nach Beacons ab.
2	Steuerkanal	Das Device hat ein Beacon mit gültigen Informationen empfangen und hat im aktuellen Superframe eine Zeitschlitz-Zuteilung. Das Device verweilt auf dem Steuerkanal und wartet seinen Zeitschlitz ab. Während dessen kann es auf dem Steuerkanal Announcements verschicken und neue Verbindungen aufbauen.
3	TOF Kanal	Der Superframe hat den dem Device zugewiesenen Zeitschlitz erreicht. Das Device wechselt auf den TOF Kanal und sendet seine Antwort.
4	Steuerkanal	Das Device wechselt zurück auf den Steuerkanal und führt die gleichen Aktionen durch wie in 2. Hier verweilt es bis zum Ende des Superframes.

5	AOA-/Datenkanal	Ist der TOF Superframe beendet wechselt das Device auf den AOA-/Datenkanal um auf ein AOA Beacon zu warten.
6	Steuerkanal	Das Device wechselt auf den Steuerkanal um seinen Zeitschlitz abzuwarten und sendet weiterhin Steuerinformationen(s. Index 2).
7	AOA-/Datenkanal	Der AOA Superframe hat den Zeitschlitz des Devices erreicht. Das Device wechselt auf den AOA-/Datenkanal und versendet seine Daten.
8	Steuerkanal	Das Device verweilt auf dem Steuerkanal und wartet den Start der CAP am Ende des AOA Superframes ab.
9	AOA-/Datenkanal	Das Device nimmt an der CAP am Ende des Superframes teil.
10	TOF Kanal	Das Device hört auf dem TOF Kanal auf Beacons.
11	Steuerkanal	Das empfangene Beacon hat keine Informationen für das Device. Es verweilt auf dem Steuerkanal, bis zum nächsten Superframe-Start.

#### 2.1.3.3.4 Kanalarbitrierung

##### 2.1.3.3.4.1 Kanalbelegung im Steuerkanal

Im Steuerkanal gibt es kein Zeitmultiplexing und somit keine fest definierte Kanalzuteilung unter den Teilnehmern. Deshalb muss vor jeder Kommunikation im Steuerkanal ein CSMA(-CA) Algorithmus (s. Kapitel 2.1.3.3.4.5) durchlaufen werden, bevor ein Paket gesendet werden darf.

##### 2.1.3.3.4.2 Kanalbelegung im TOF-Superframe

Die Kanalbelegung im TOF Superframe ist unterteilt. Da die einzelnen Koordinatoren untereinander synchronisiert sind werden die Beacon, welche den TOF Superframe einleiten ebenfalls synchron versendet. Um hier Kollisionen zu vermeiden müssen Koordinatoren vor dem Senden des nächsten Beacons ebenfalls ein CSMA(-CA) Algorithmus durchlaufen. Dies erfordert eine Verlängerung des Beacon-Zeitschlitzes auf die maximal mögliche Verzögerungsdauer, welche durch das CSMA(-CA) verursacht wird.

Innerhalb des eigentlichen TOF Superframes kommt ein Zeitmultiplexing zum Einsatz, wodurch hier auf weitere Kanalzugriffsregeln verzichtet werden kann.

##### 2.1.3.3.4.3 Kanalbelegung im AOA Superframe

Ein AOA Superframe kann von einem Koordinator nur eingeleitet werden, wenn er zuvor erfolgreich einen TOF Superframe abgeschlossen hat. Dies macht die Verwendung von Kanalzugriffsregelungen für die AOA Beacons überflüssig.

Innerhalb des AOA Superframes wird der Kanalzugriff ebenfalls durch das verwendete Zeitmultiplexing geregelt.

Falls am Ende des Superframes eine CAP folgt, so wird hier der Zugriff über den CSMA(-CA) Algorithmus geregelt.

##### 2.1.3.3.4.4 Ausnahmen für ACK NAK und REJ

Eine Ausnahme beim Kanalzugriff bilden die Nachrichten der ACK Familie ACK, NAK und REJ. Diese Nachrichten können und sollen direkt versendet werden, um Verzögerungen und

zu häufig auftretende Timeouts zu vermeiden. Dies erfordert eine entsprechende Konfiguration des CSMA(-CA) Algorithmus, so dass diese Pakete keine erhöhte Kollisionsrate verursachen.

#### 2.1.3.3.4.5 CSMA-CA Verfahren

Bei der Kommunikation im Steuerkanal und in den CAP Abschnitten der AOA Superframes finden weder eine zentrale Zuweisung des Kanals noch eine Synchronisation in Zeitschritten statt. Daher ist hier der Einsatz eines Verfahrens erforderlich, der einen dezentral verwalteten Zugriff auf den Kanal ermöglicht und dabei einen möglichst hohen Gesamtdatendurchsatz ermöglicht.

Das ist eine klassische Aufgabe für ein MAC Protokoll, wie es auf Schicht 2 des ISO/OSI Modells eingesetzt wird. Für den hier vorliegenden Anwendungsfall wird eine angepasste Version des vom IEEE802.11 bekannten CSMA(-CA), bzw. MACA (Medium Access with Collision Avoidance) eingesetzt.

#### 2.1.3.4 Security und Safety

SIZEDN – in Security und Safety f. Gesamtsystem

#### 2.1.3.5 Spezifikation Rahmenformate

Um die Funktionalität des Funknetzwerkes letztendlich abbilden zu können, ist es erforderlich, für die Kommunikationsabläufe entsprechende Rahmenformate zu definieren. Diese Rahmenformate legen fest, wie bestimmte Abläufe, Anfragen und Antworten über die Funkchnittstelle kommuniziert werden. Das allgemeine Rahmenformat setzt sich hier zusammen aus einem MAC Header (MHR), dem MAC Payload und dem MAC Footer (MFR), wie in Abbildung 21 gezeigt.

#Bytes	2B	1B	2B (short addr) 6B(long addr)	2B (short addr) 6B (long addr)	Variable	2B
Name	Frame Control	Length	Destination Address	Source Address	Frame Payload	FCS
			Addressing Fields			
Section	<i>MHR</i>				<i>MAC Payload</i>	<i>MFR</i>

**Abbildung 21: Allgemeines MAC Rahmenformat**

Das in Abbildung 21 gezeigte allgemeine Rahmenformat kann für jede Art von Frame spezifisch erweitert werden, so dass unterschiedliche Funktionen damit abgedeckt werden können. Alle Nachrichten innerhalb des Netzwerkes werden nach diesem Muster aufgebaut.

#### 2.1.3.6 Netzwerkintegration

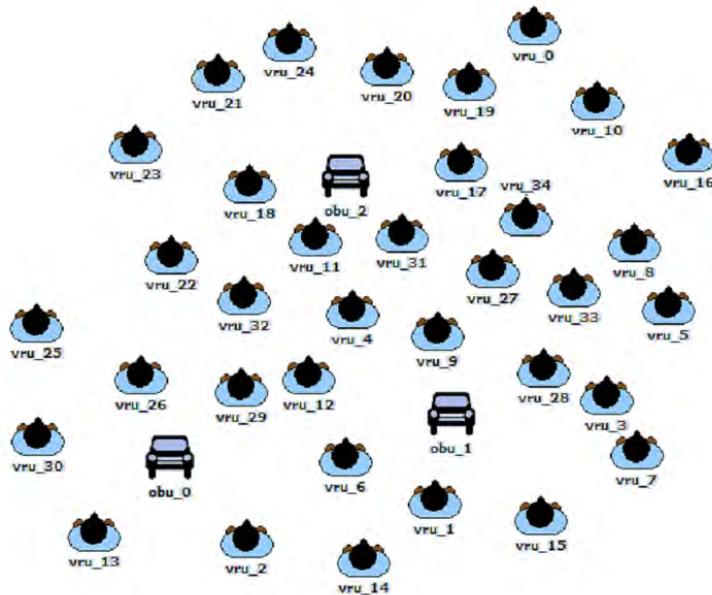
Die Simulation von Protokollen hat einen sehr bedeutsamen Teil zu der Entwicklung des Funkprotokolls und der Netzwerkintegration beigetragen. So war es mit Hilfe von Simulationen möglich, bereits definierte Ansätze ohne vorhandene Zielhardware zu verifizieren, zu verbessern und zu erweitern. Auch ist durch die Simulation die Möglichkeit gegeben, z.B. das Verhalten von größeren Netzwerken aufzuzeigen, ohne dass dazu die entsprechende Anzahl an Geräten vorliegen muss, oder auch verschiedene Architekturen zu vergleichen.

##### 2.1.3.6.1 Allgemeiner Simulationsaufbau

Die Simulationsmodelle wurden mit Hilfe des OPNET Modelers erstellt. Hierbei werden die Modelle über verschiedene Stufen aufgebaut, die sich hinsichtlich ihrer Komplexität unterscheiden. Die Modellierung auf den ersten Stufen kann noch über eine grafische Modellierung erfolgen, um letztendlich die Funktionalität zu beschreiben muss das Verhalten der Modelle über Quelltexte implementiert werden.

##### 2.1.3.6.2 Szenarien

Die oberste Modellierungsstufe bilden die Szenarien. In Szenarien wird beschrieben, welche und wie viele Knoten an der Simulation teilnehmen. So kann hier z.B. die Anzahl von VRUs und OBUs oder deren Relation bestimmt werden. Der Simulator erlaubt es hier auch Bewegungsmodelle mit einzubringen, um die Dynamik des Netzwerks abzubilden.



**Abbildung 22: OPNET Beispielszenario**

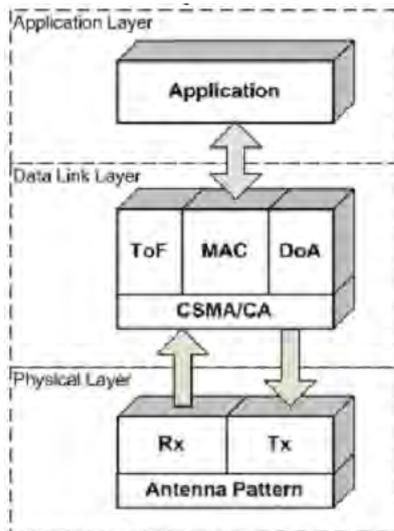
### 2.1.3.6.3 Prozessmodellierung

Die erste Implementierungsstufe erfolgt über sogenannte Prozesse. Prozesse repräsentieren generell eine abgeschlossene Teilaufgabe, welche üblicherweise auf die Schichten des OSI-Referenz-Modells abgebildet werden, wie für unseren Fall in Abbildung 23 dargestellt.

Die unteren Schichten repräsentieren die Charakteristiken des physikalischen Kanals. Hierzu zählen beispielsweise die Trägerfrequenz und die Modulationsart. Zusätzlich können hier noch eigene Antennen-Modelle mit eingefügt werden, um deren Auswirkungen auf das Netzwerk zu untersuchen.

Die mittlere Schicht wird durch den Data Link Layer (DLL) repräsentiert. Der DLL Prozess ist gemäß dem Funkprotokoll in vier Teilblöcke unterteilt die die unterschiedlichen Aufgaben bearbeiten.

Auf der letzten Schicht befindet sich der Applikationsblock, welche die eigentliche Logik des Modells beinhaltet. Abhängig vom Knoten-Typ wie z.B. VRU oder OBU kommen hier unterschiedliche Implementierungen der Applikation zum Einsatz.



**Abbildung 23: Prozesse des OPNET Simulationsmodells**

#### 2.1.3.6.4 Prozessimplementierung

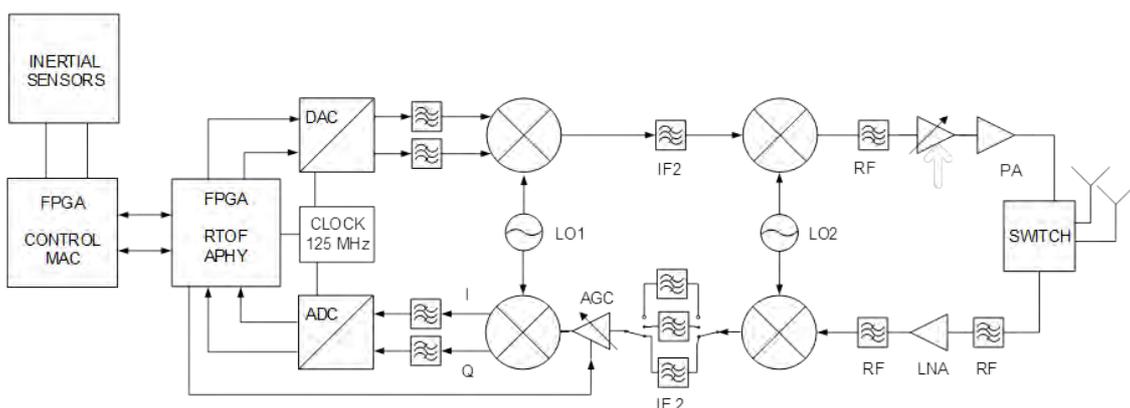
Die Implementierung der Prozesse erfolgt über C/C++ Quelltexte. Hier werden zum einen State-Machines umgesetzt, die die Funktionalität der Modelle beschreiben, zum anderen können hier Messpunkte gesetzt werden, mit deren Hilfe letztendlich Statistiken generiert werden können.

## 2.2 Mobile Sendeempfänger

### 2.2.1 Erstellung Prototypen Sendeempfänger

#### 2.2.1.1 Layout HF Teil

Da während der Laufzeit des Projekts Ko-TAG kein kommerziell erhältlicher Chipsatz existierte, mit dem der Zugriff auf den Funkkanal für das Empfangen und Senden der Ortungssequenzen und Kommunikationssignale möglich wäre, wurde von der TUM ein eigenes Hochfrequenz-Frontend entwickelt.

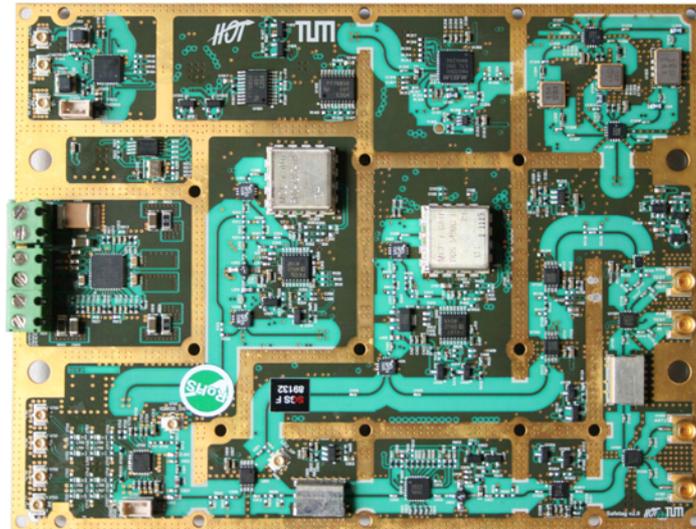


**Abbildung 24: Vereinfachtes Blockschaltbild des SafeTAG 2.0 Transponders**

Dieses HF-Frontend unterstützt die verschiedenen benötigten Funkkanäle, deren Mittenfrequenzen flexibel im Bereich 5,775 bis 5,925 GHz eingestellt werden können. Die Kanalbandbreiten können zu 10 MHz für die Datenkanäle, 54 MHz für die Abstandsmessung, und 90 MHz für weitergehende Tests gewählt werden. Im Empfänger ist eine Kette aus verstellbaren Verstärkern integriert, die eine sehr schnell einstellbare Verstärkung von 0 bis 62 dB abdecken und so zusammen mit dem Spartan-6-FPGA eine extrem schnelle digitale Regelungsschleife ermöglichen. Im Gegensatz zur Empfängertechnik in SafeTAG 1.0 und Amulett

unterstützt der SafeTAG 2.0 Transceiver jede komplexe Modulation, da sowohl im Sender als auch im Empfänger das Basisbandsignal komplex in Inphase- und Quadraturanteil abgetastet wird. Damit wird die Umsetzung einer modernen, robusten und schnellen Datenübertragung wie die vom Fraunhofer HHI für SafeTAG 2.0 realisierte OFDM-Kommunikation in Anlehnung an den IEEE 802-11p-Standard ermöglicht.

Das SafeTAG 2.0 HF-Frontend wird von einem eigenen Mikrocontroller gesteuert, der zur Minimierung der Leistungsaufnahme alle größeren Verbraucher auf dem Frontend einzeln zu- und abschalten kann. Die Frontendfirmware kann, wie die Firmware aller in SafeTAG 2.0 verwendeten Module, über die externe Netzwerkschnittstelle aktualisiert werden.



**Abbildung 25: SafeTAG 2.0 HF-Frontend**

#### 2.2.1.2 Schaltplan und Layout Logikteil

Für die Umsetzung der Kommunikationseinheit, wurde vom SIZEDN im Rahmen des Ko-TAG Projektes eine entsprechende Kommunikationsplattform entwickelt. Sie besteht aus zwei einzelnen Modulen, dem sogenannten Base-Board und dem FPGA-Board (DBM3\_2AGX260). Diese Aufteilung wurde gewählt, um einzelne Komponenten auf verschiedenen Gerätetypen verwenden zu können. So verwenden beispielsweise SafeTAGs das gleiche FPGA-Modul wie Lokalisierungseinheiten, benötigen allerdings unterschiedlich ausgestattete Base-Board.

Eine Skizze des Base-Boards ist in Abbildung 26 und eine Skizze des DBM3\_2AGX260 in Abbildung 27 zu sehen. Abbildung 28 zeigt die fertig produzierte CCM Hardware mit zusätzlich aufgesteckten Debug-Header.

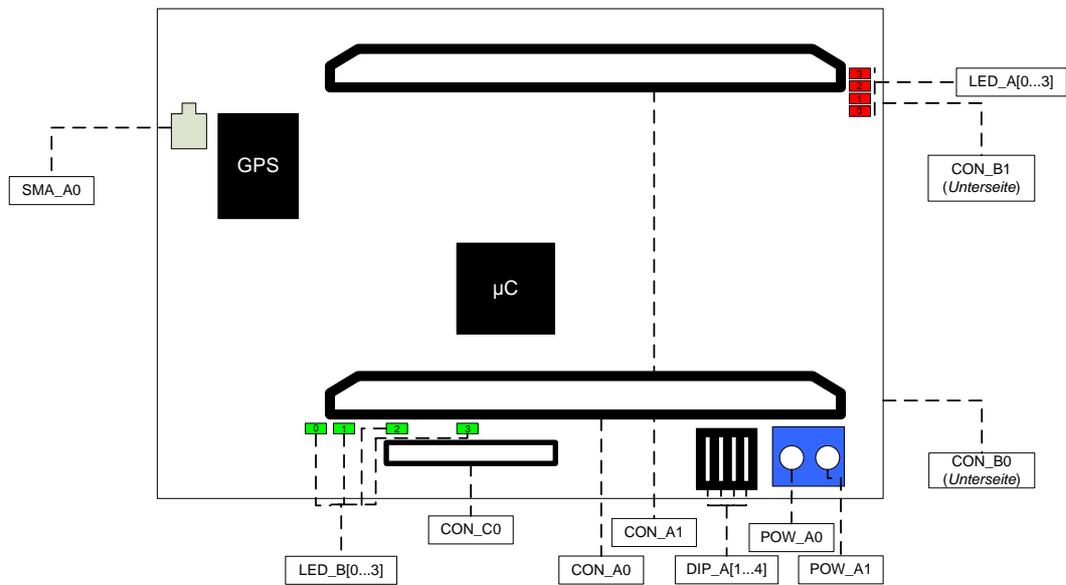


Abbildung 26: Skizze des Base-Boards und dessen relevanten Bauteilen

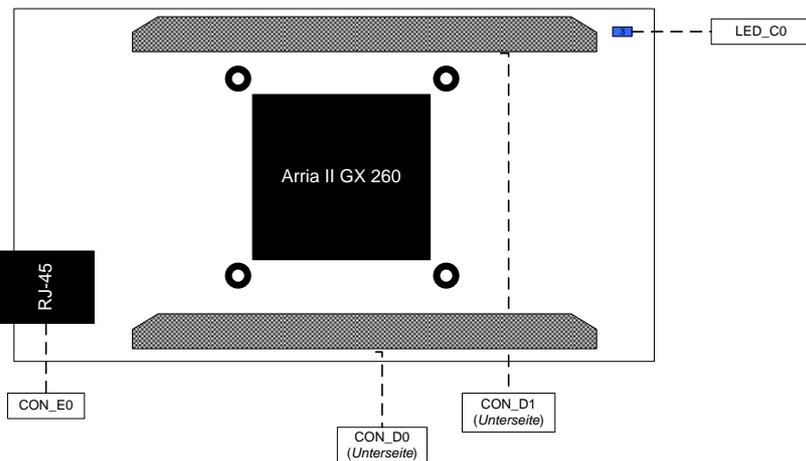


Abbildung 27: Skizze des DBM3\_2AGX260 und dessen relevanten Bauteilen



Abbildung 28: Finale Kommunikationsplattform (inkl. Debug-Header)

## 2.2.2 Implementierung Hw/Sw-Firmware für Sendeempfänger

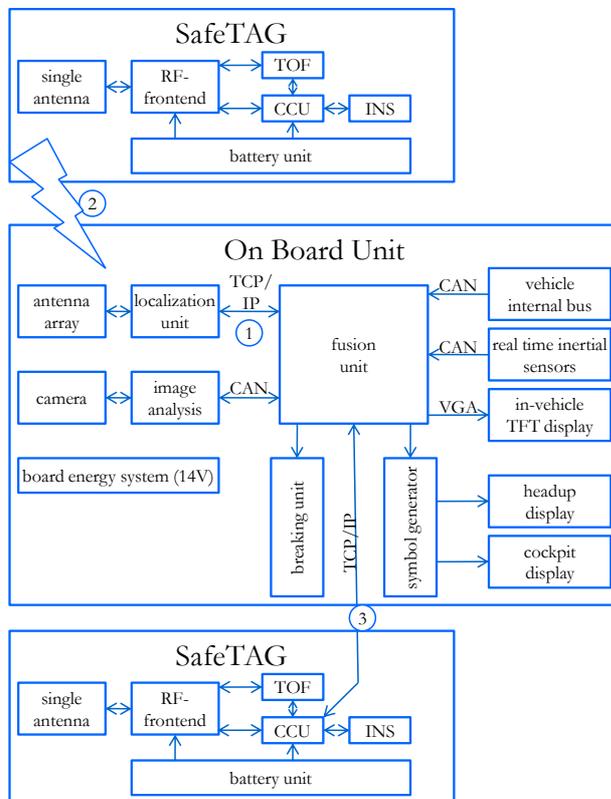
### 2.2.2.1 MAC-Funktionalität

#### 2.2.2.1.1 Generelle Architektur

Die generelle Systemarchitektur besteht aus mehreren Teilkomponenten, um die einzelnen, in den Lokalisierungsprozess verankerten Aufgaben zu bewältigen. Dazu sind das System und die entsprechenden Protokolle auf zwei grundlegende Geräte-Typen aufgebaut:

- Den Fahrzeugen, die mit einer Lokalisierungseinheit und einer Fusionseinheit ausgestattet sind. Mit Hilfe dieser Komponenten sind die Fahrzeuge dazu in der Lage andere Verkehrsteilnehmer zu orten.
- Den SafeTAGs (ST), die durch aktive Transponder realisiert werden. Diese Transponder müssen z.B. von Fußgängern getragen werden, um von Fahrzeugen lokalisiert werden zu können. SafeTAGs können auch in Fahrzeugen verbaut werden, wodurch sie zu sogenannten VehicleTAGs (VT) werden. Mit VT ausgestattete Fahrzeuge können so von anderen Fahrzeugen geortet werden.

Abbildung 29 zeigt den generellen Aufbau der Ko-TAG Architektur am Beispiel einer On-Board Unit, eines SafeTAGs und eines VehicleTAGs. Sie zeigt ebenfalls den groben Aufbau der Ortungseinheit. Diese besteht unter anderem aus zwei größeren Teilkomponenten, der Fusionseinheit (FE) und der Lokalisierungseinheit (LE).



**Abbildung 29: Generelle Architektur des Ko-TAG Systems**

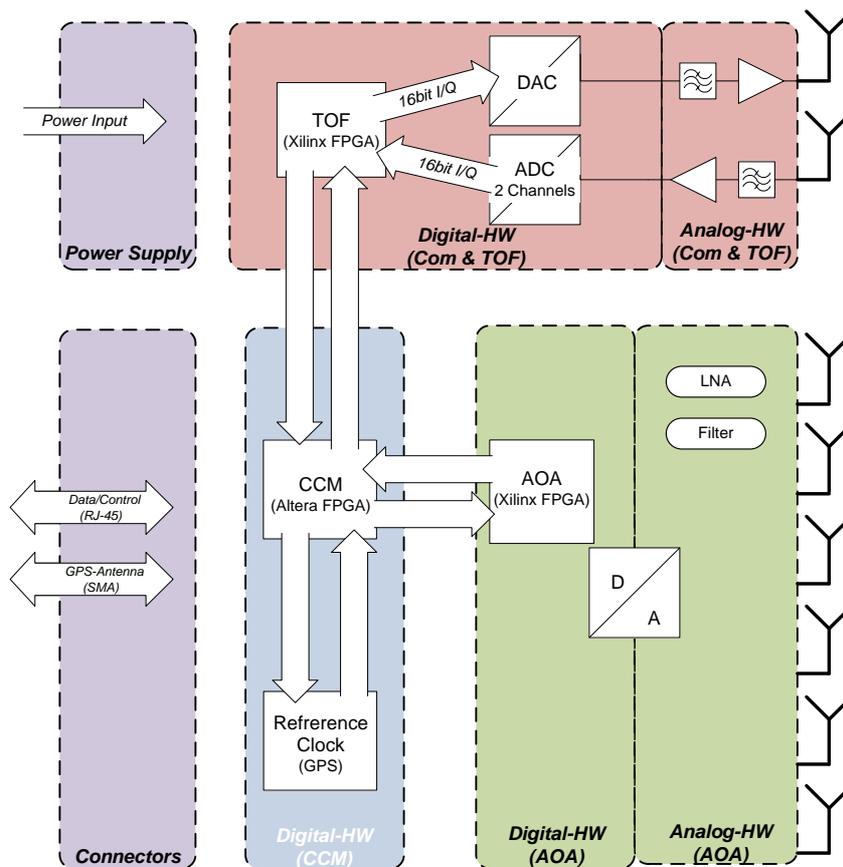
## 2.2.2.1.2 Soft- und Firmware

### 2.2.2.1.2.1 Aufbau der Lokalisierungseinheit

Die Lokalisierungseinheit ist aus mehreren Teilkomponenten aufgebaut, wie in Abbildung 30 gezeigt wird. Dazu zählen

- Ein Time-of-Flight (TOF) System, das für die Abstandsmessung verantwortlich ist.
- Ein Angle-of-Arrival System. Mit Hilfe dieser Komponenten können Winkel über eintreffende Datenpakete berechnet werden.
- Ein sogenanntes Communication & Control Module (CCM). Dieses Modul wurde sowohl in Bezug auf die Hardware als auch auf die Software vom Team des SIZEDN entwickelt. Dieses Modul ist verantwortlich für die Handhabung des Kommunikations-

protokolls und für die Steuerung und Koordination der verbundenen Teilkomponenten.

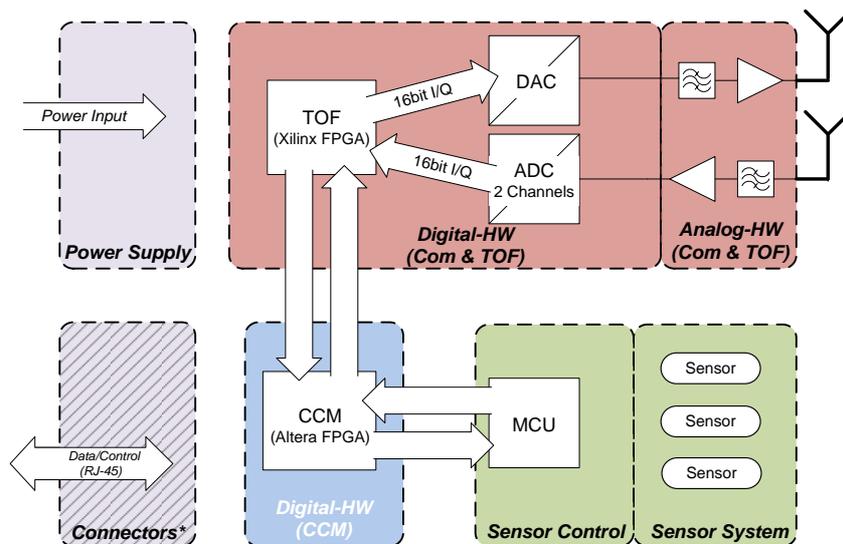


**Abbildung 30: Architektur der Lokalisierungseinheit**

#### 2.2.2.1.2.2 Aufbau des SafeTAGs

Der Aufbau des SafeTAGs zeigt einige Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede im Gegensatz zum Aufbau der Lokalisierungseinheit.

- Das SafeTAG beinhaltet auch ein TOF System. Dieses ist hier allerdings weniger komplex aufgebaut, da hier keine Berechnungen durchgeführt werden müssen.
- Das Angle-of-Arrival System ist hier nicht vorhanden, da das SafeTAG keine Winkel berechnen muss. Stattdessen ist hier ein zusätzliches Sensormodul verbaut. Dieses stellt weitere Informationen über den Träger, wie Geschwindigkeit oder den Bewegungsstatus bereit, die mit übertragen werden, um dann beim Fahrzeug mit in die Kollisionsberechnung einzufließen.
- Auch hier ist ein Communication & Control Module (CCM) vorhanden, um die angeschlossenen Komponenten und das Funkprotokoll zu handhaben



\* only present for omnidirectional safety

**Abbildung 31: Architektur des SafeTAGs**

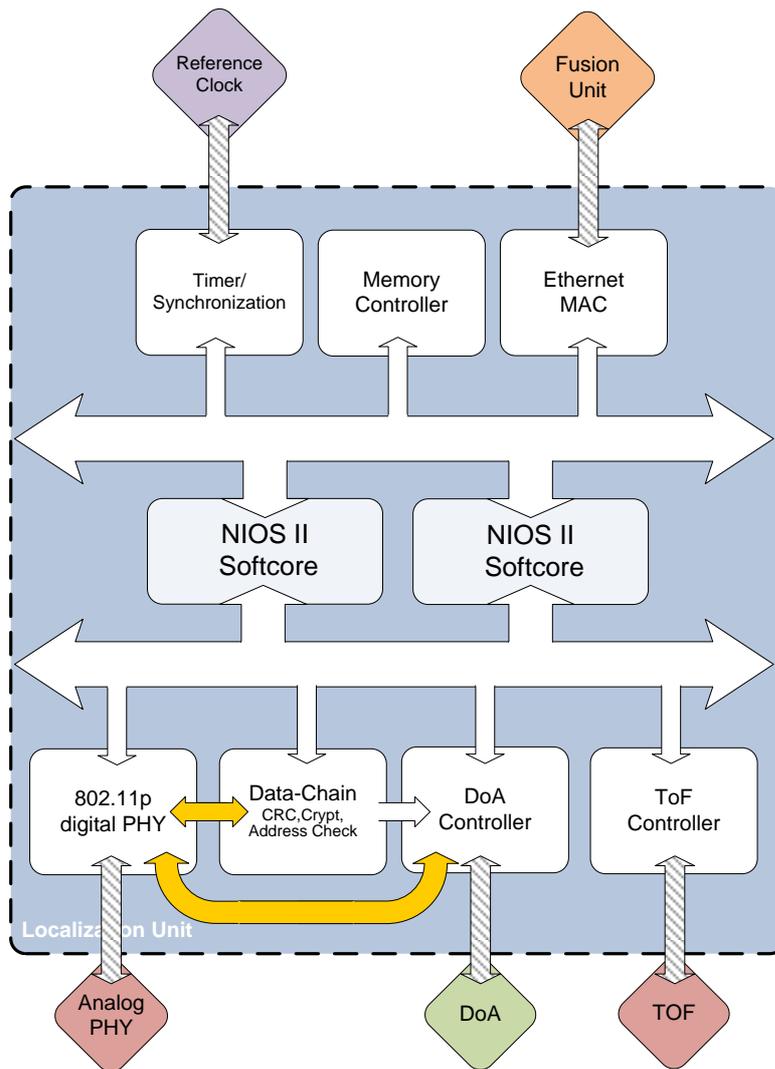
### 2.2.2.1.2.3 Das Communication & Control Module (CCM)

Neben einzelnen Subsystemen beinhalten sowohl die LUs als auch die SafeTAGs ein Communication & Control Module, welches für das Netzwerkmanagement und für die Steuerung und Koordination der einzelnen Teilkomponenten innerhalb des Systems zuständig ist.

Die Kommunikationseinheit ist innerhalb eines Hardware-Software Co-Designs in einem Altera FPGA der Arria2GX Familie aufgebaut. Die folgenden Unterabschnitte stellen die einzelnen Bausteine des Designs vor.

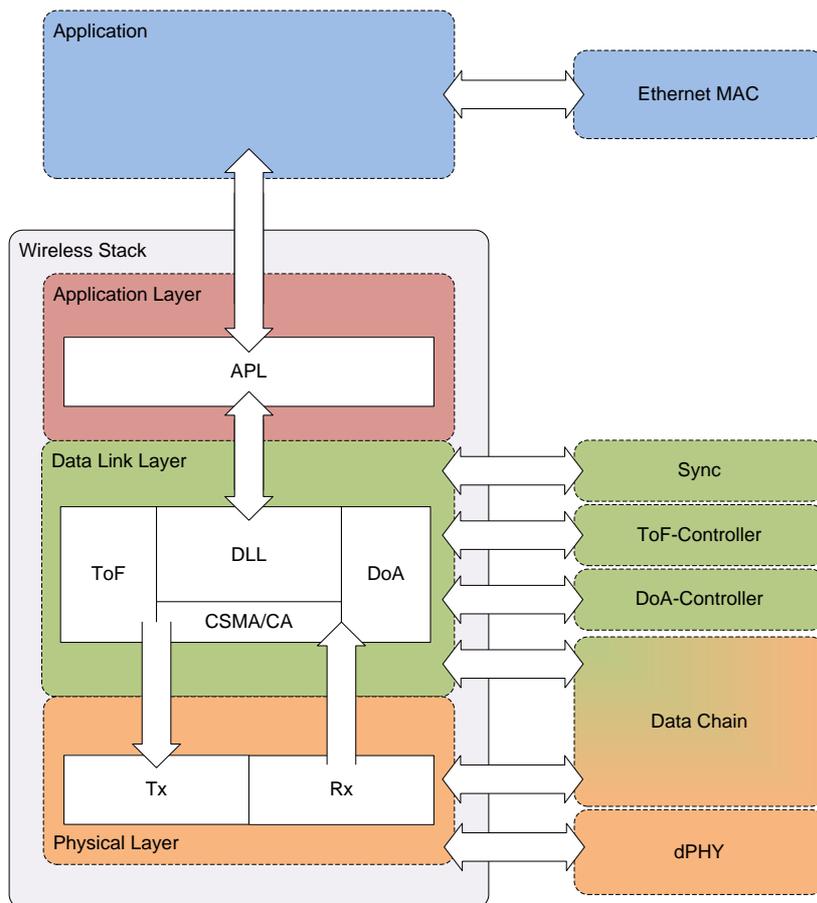
#### 2.2.2.1.2.3.1 NIOS2 Softcore Prozessor

Das Zentrum der Netzwerkimplementierung bildet ein NIOS2-DualCore Prozessorsystem, welches als Softcore in das FPGA-Design integriert ist. Der Prozessor kommuniziert mit diversen Hardware-Komponenten über separate Controller und ist im Wesentlichen verantwortlich für das Netzwerkmanagement. Abbildung 32 zeigt den Aufbau des Prozessorsystems innerhalb der FPGA-Designs.



**Abbildung 32: Aufbau des Prozessorsystems des Communication & Control Moduls**

Für den Prozessor wurde eine Firmware zur Bearbeitung von Kommunikations- und Lokalisierungsaufgaben entwickelt, die die benötigten Netzwerkfunktionen implementiert. Diese Firmware ist vor allem für die Ansteuerung der einzelnen Komponenten und für das Management des Funknetzwerkes verantwortlich. Dabei werden die Hauptaufgaben, neben Treiber- und Applikationsimplementierungen, in einem Kommunikations-Stapel abgearbeitet der drei Schichten abdeckt. Dazu zählen die physikalische Schicht (PHY), die Datensicherungsschicht (DLL/MAC) und die Applikationsschicht (APL). Der Aufbau der Software wird in Abbildung 33 gezeigt. Auf ein Betriebssystem wird aufgrund der harten Echtzeitanforderungen verzichtet.



**Abbildung 33: Aufbau der Softwareimplementierung**

Die unteren Schichten der Software, wie die Softwareansteuerung des PHYs sind in erster Linie verantwortlich für das Senden und Empfangen von Funkpaketen, wofür die entsprechenden Treiber für die Ansteuerung des PHYs und der Datenpfadkomponenten.

Die Datenschichtungsschicht stellt den komplexesten Teil der Software dar, da sie sowohl die Hauptaufgaben der Netzwerkverwaltung, wie das Verteilen der Kanalressourcen, als auch für die Ansteuerung der externen Komponenten für den Lokalisierungsprozess verantwortlich ist.

Die Applikationsschicht ist hauptsächlich auf den Ortungseinheiten ausgeprägt. Hier werden die einzelnen Schritte vorgenommen, um eine Priorisierung der jeweiligen Netzwerkteilnehmer zu ermöglichen. Die Anwendung die über dem Wireless Stack läuft, beinhaltet die Implementierung der Netzwerkschnittstelle. Über diese ist die Ortungseinheit mit der Fusions-einheit verbunden.

#### 2.2.2.2 Security / Safety

Die in dem Arbeitspaket Security & Safety definierte Sicherheitsarchitektur wurde in einer Beispielimplementierung umgesetzt. Die Implementierung der Sicherheitsarchitektur kann auf der CCU von OBU und VRU, sowie in der OPNET Simulation ausgeführt werden.

##### 2.2.2.2.1 Auswahl der kryptografischen Bibliothek

Das Konzept der Sicherheitsarchitektur beinhaltet verschiedene kryptografische Algorithmen die für die verschiedenen Sicherheitskomponenten notwendig sind. Diese Algorithmen sollen nicht selbst entwickelt werden, weshalb eine geeignete Bibliothek notwendig ist die alle benötigten Algorithmen bereitstellt. Diese Bibliothek muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Bereitstellen der Algorithmen AES, ECDSA und SHA-256
- Kompatibel zu dem GCC C Compiler
- Frei verfügbar, auch im kommerziellen Umfeld

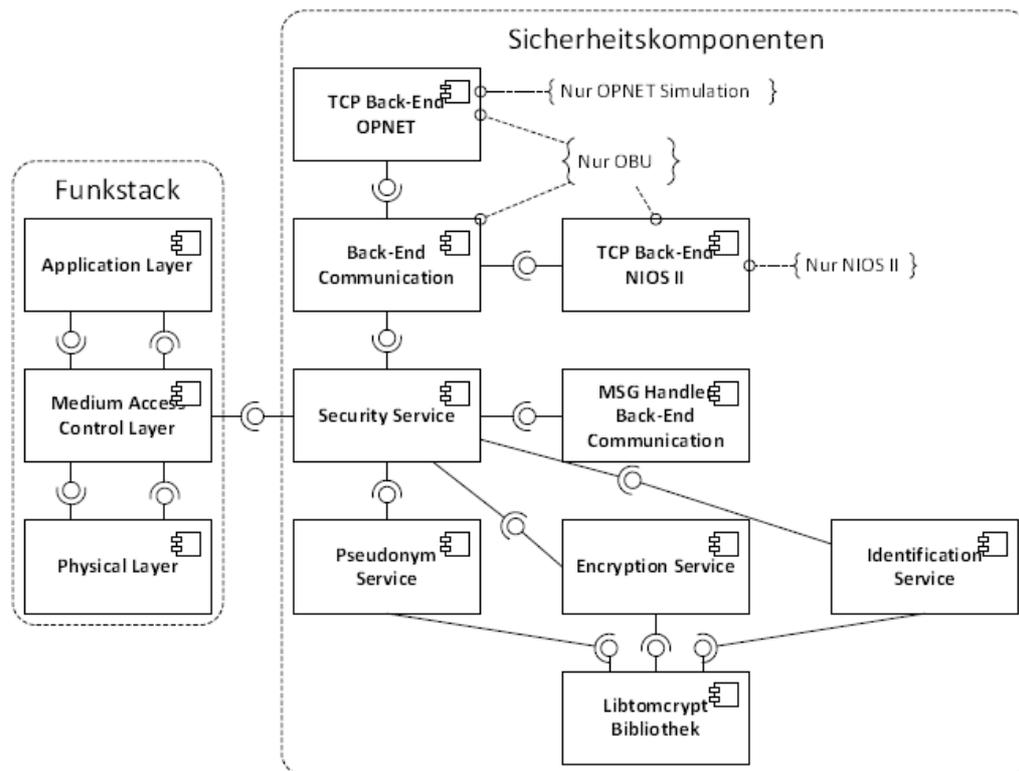
Folgende Bibliotheken erfüllen diese Anforderungen und wurden deshalb in Betracht gezogen:

- OpenSSH
- OpenSSL
- LibTomCrypt

Die LibTomCrypt Bibliothek erfüllt diese Anforderungen am besten, da diese auch im kommerziellen Umfeld frei verfügbar ist und in C implementiert ist und somit mit dem GCC C Compiler kompatibel ist.

#### 2.2.2.2 Implementierung

In Abbildung 34 ist die Struktur der Sicherheitskomponenten für OBU und VRU dargestellt. Die Sicherheitskomponenten werden auf dem Medium Access Control (MAC) Layer in den Funkstack integriert. Für den Zugriff auf die Sicherheitskomponenten benötigt der Funkstack lediglich die Schnittstelle zu dem SS, welcher die Verbindung zu dem restlichen Sicherheitskomponenten herstellt. Diese arbeiten transparent für den Funkstack. Zusätzlich zu den aus dem Konzept der Sicherheitsarchitektur schon bekannten Sicherheitsdienste, sind noch die Softwarekomponenten für die Kommunikation mit der Back-End Infrastruktur, sowie für die Nachrichtenverarbeitung hinzu gekommen. Da die Implementierung sowohl in der OPNET Simulation, als auch auf der Ko-TAG Hardware eingesetzt werden soll, sind zwei verschiedene TCP Implementierungen für die Kommunikation mit der Back-End Infrastruktur notwendig. Dies ist der Fall, da die OPNET Simulation und der NIOS II verschiedene Compiler verwenden, welche verschiedene Bibliotheken für die Socket Kommunikation einbinden. Damit die benötigte TCP Implementierung zur Übersetzungszeit automatisch ausgewählt werden kann, greift der SS nicht direkt auf diese zu, sondern auf die „Back End Communication“ Komponente. Diese abstrahiert die konkrete TCP Implementierung und fungiert somit als ein Wrapper. Die Verarbeitung eingehender Nachrichten von der Back-End Infrastruktur und die Erstellung der Nachrichten an die Back-End Infrastruktur wird von der Komponenten „MSG Handler Back-End Communication“ realisiert.



**Abbildung 34: Softwaredesign Sicherheitsarchitektur**

Für die Back-End Infrastruktur wurde eine Dummy Implementierung erstellt. Diese wurde als Windowsanwendung in der Programmiersprache C++ realisiert. Sie beinhaltet die wichtigsten Mechanismen der Back-End Infrastruktur welche benötigt werden, um die Sicherheitskomponenten auf den Fahrzeuge und VRUs zu testen.

### 2.2.2.3 Ortungssystem

Die mit dem Ko-Tag System ausgestatteten Fahrzeuge haben eine Ortungseinheit (On-Board-Unit) verbaut, die in regelmäßigen, sehr kurzen zeitlichen Abständen an die Fußgänger in der Umgebung jeweils einen Pseudo-Noise Code senden. Dieser Code wird dann, nach einer gewissen vorgegebenen Wartezeit, von den Fußgängereinheiten wieder an die OnBoard-Unit zurückgesendet. Um hierbei die gleichzeitige Benutzung des Kanals durch mehrere Fußgänger oder Infrastruktureinheiten zu vermeiden und zusätzlich eine direkte Zuordnung des Antwortcodes zu einer mobilen Einheit zu ermöglichen, sind die Wartezeiten für jede Fußgänger, VehicleTAG- und RSU-Einheit unterschiedlich. Bei der Generation 1.0 des Systems sind diese Wartezeiten noch fest vergeben, während diese bei der Generation 2.0 von den Fahrzeugeinheiten dynamisch den TAG-Einheiten zugewiesen werden. Zur besseren Verdeutlichung des Konzepts ist der zeitliche Ablauf der Abstandsmessung in Abbildung 35 dargestellt.

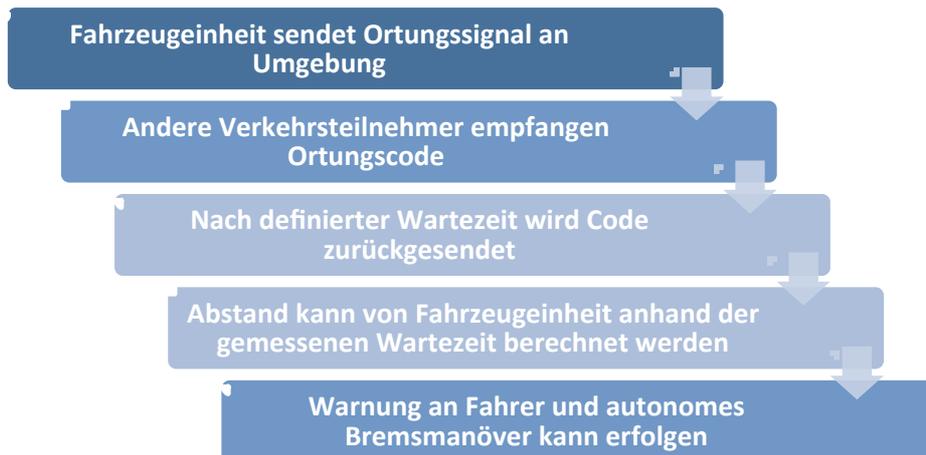


Abbildung 35: Ablauf der Ortung zwischen Auto- und Fußgängereinheit

Für die Implementierung der benötigten Messalgorithmen wurde ein FPGA (Field Programmable Gate Array) verwendet. Diese Logikbausteine bieten die Möglichkeit komplexe Digitalstrukturen aus frei wählbaren Logikschaltungen zu kombinieren.

Das Kernelement des Abstandsmesssystems ist das Korrelationsfilter für die Pulskompression. Dabei erfolgt die Korrelation auf dem FPGA in Realzeit. Die Korrelation wurde als FIR (Finite Impulse Response) Filter im FPGA implementiert. Deutlich hervortretende Maxima im Korrelationsergebnis gehören dabei immer zu empfangenen Antworten der Transpondereinheiten. Die Bestimmung der Position/Zeitpunkte dieser Maxima erlaubt damit die Ankunftszeitbestimmung und damit die Bestimmung des Abstandes zwischen den Ortungseinheiten und den Transpondern.

## 2.2.3 Integration INS Sensorknoten Sendeempfänger

### 2.2.3.1 Detektion der Trageposition vom TAG

Algorithmus zur Bewegungsklassifikation

Um Bewegungen anhand der gemessenen Signale zu erkennen, wird ein Algorithmus entwickelt, der die Signale aufbereitet, die Merkmale berechnet und diese anschließend ausgewertet. In der Vereinfachten Blockschaltbild der Bewegungsklassifikation ist die allgemeine Struktur der Bewegungsklassifikation dargestellt.

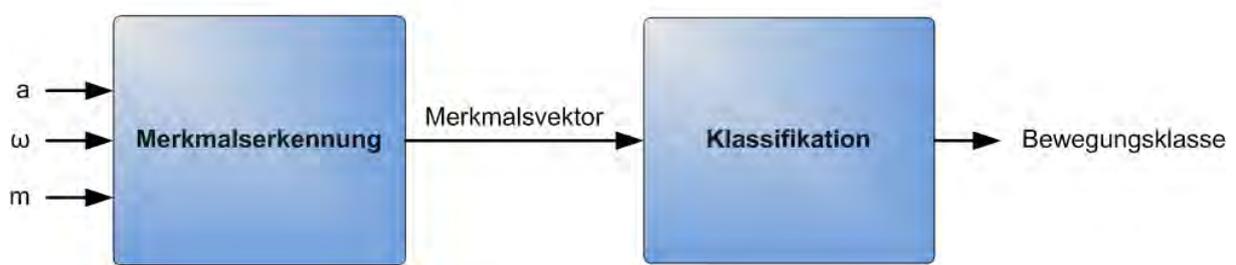
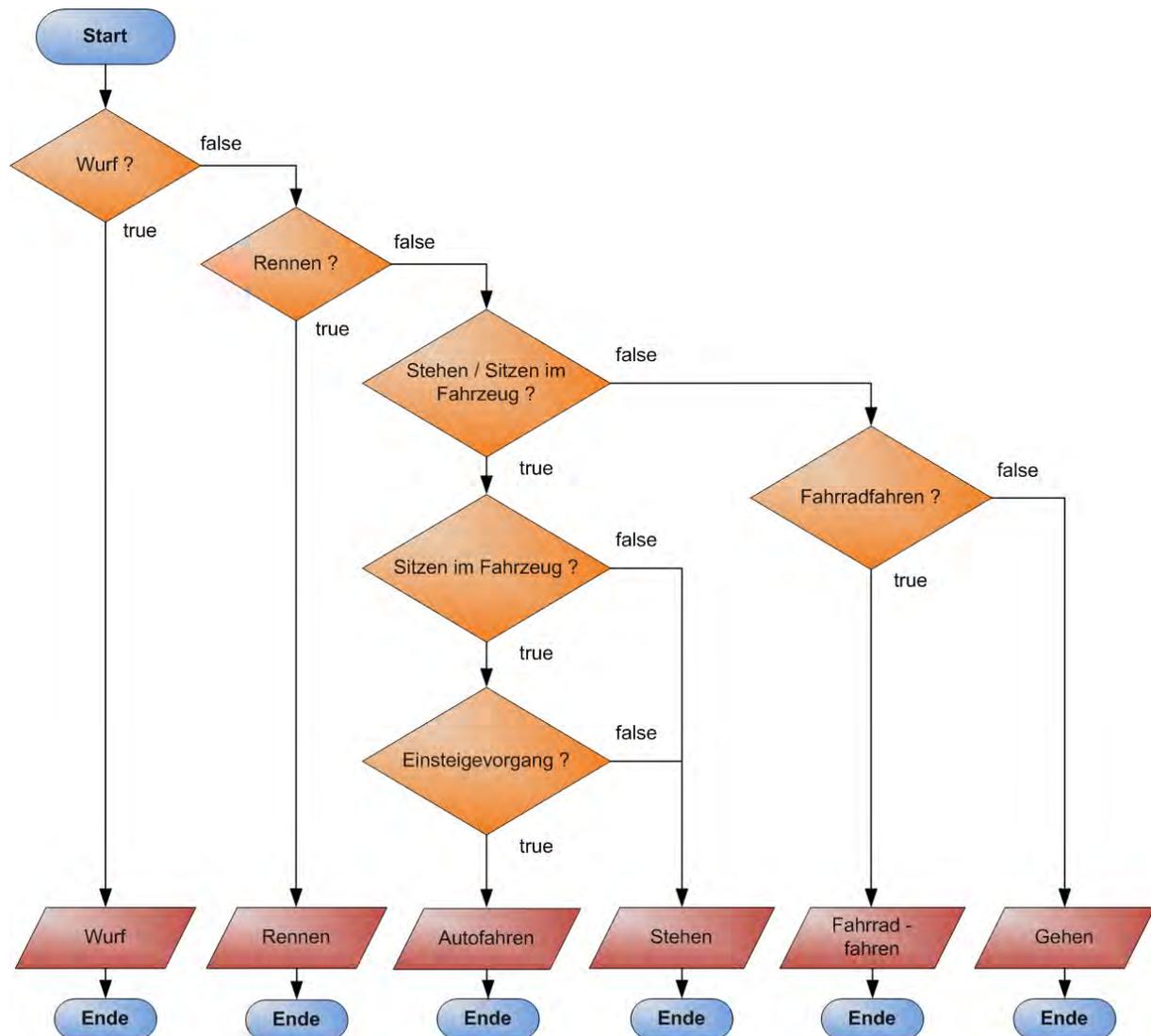


Abbildung 36: Vereinfachtes Blockschaltbild der Bewegungsklassifikation

Man sieht links den Dateneingang der Sensoren und rechts, als Ergebnis, die erkannte Bewegungsklasse. Die Datenaufbereitung und die Merkmalsextraktion werden im Block Merkmalerkennung durchgeführt. Die aus den Signalen gewonnenen Merkmale werden in gebündelter Form als Merkmalsvektor an den zweiten Block, der Klassifikation, weitergegeben und ausgewertet. Das Ergebnis der Klassifikation ist eine Bewegungsklasse.

Klassifikation

In Entscheidungsbaum (decision tree) der Klassifikation ist die Klassifikation anhand eines Entscheidungsbaums dargestellt.



**Abbildung 37: Entscheidungsbaum (decision tree) der Klassifikation**

Die Reihenfolge, der zu klassifizierenden Bewegungsklassen ist, bis auf eine Ausnahme, willkürlich gewählt. Die Bewegungsklasse Wurf weist hier die höchste Priorität auf. Das liegt daran, dass bei der Klassifikation dieser Sondersituation von einer fehlerhaften Benutzung oder einem Missbrauch des SafeTAGs ausgegangen werden muss und im Anschluss darauf entsprechende Maßnahmen getroffen werden müssen.

### 2.2.3.2 Bewegungsklassifikation

Das Bewegungsverhalten eines Menschen wird nun in vier verschiedene Bewegungsarten und zwei Sondersituationen unterteilt. Die vier Bewegungsarten sind in Abbildung 39 abgebildet. Diese Bewegungsarten stellen die grundlegendsten und häufigsten Bewegungen eines Fußgängers im Straßenverkehr dar. Die beiden Sondersituationen sind in Abbildung 38 dargestellt.

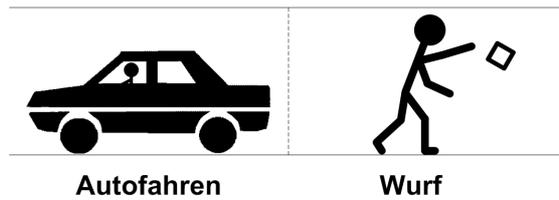


Abbildung 38: Sondersituation: Autofahren - Wurf

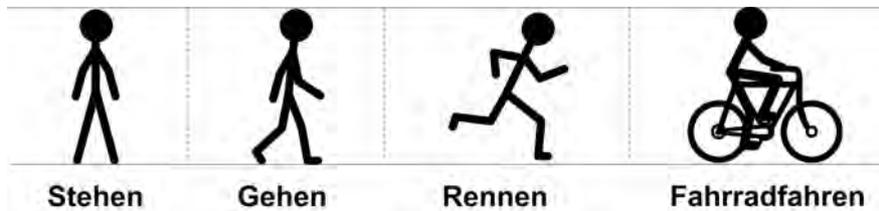


Abbildung 39: Bewegungsarten: Stehen - Gehen - Rennen - Fahrradfahren

Steigt beispielsweise ein Fußgänger in ein Fahrzeug ein, ist es wichtig, dass sich der SaFeTAG gegenüber den anderen Fahrzeugen nicht länger als Fußgänger ausweist. Des Weiteren ist nicht auszuschließen, dass ein TAG auf unnatürlichem Wege in den Gefahrenbereich eines Fahrzeugs gelangt, zum Beispiel durch einen Wurf. Im Verlauf der Arbeit werden die beiden Begriffe Sondersituationen und Bewegungsarten auch zusammengefasst als Bewegungsklassen oder Zustände bezeichnet.

## 2.3 Bordautonome Ortungseinheit

### 2.3.1 Gesamtkonzept Ortungseinheit

#### 2.3.1.1 Integration Goniometer/Abstandsmesssystem

Die Aufteilung der Transponderantworten auf unterschiedliche Zeitschlitze erlaubt eine eindeutige Zuordnung der gemessenen Abstände und Winkel zu den Transpondern. Diese Information wird dann auch in nachgelagerten Trackingalgorithmen verwendet. Dadurch ist es möglich die Transponder getrennt voneinander zu verfolgen.

In den realisierten Prototypensystemen werden die Abstands- und Winkelinformationen für die zu ortenden Transponder nicht nur in getrennten Zeitabschnitten sondern auch mit getrennter Hard- und Software gesammelt. Diese Aufteilung wurde im Projekt so gewählt, da die Aufgaben Winkelmessung und Abstandsmessung von verschiedenen Projektpartnern durchgeführt wurden und so die Entwicklung und Tests der einzelnen Funktionsgruppen getrennt erfolgen konnte. Im Sinne einer Baugrößenreduktion, Kostenersparnis und auch im Sinne einer umfassenderen Signalauswertung ist aber auch eine vereinigte Lösung für Winkel- und Abstandsmessung möglich und wurde im Projekt genauer betrachtet. Die 3 wesentlichen Untergliederungen sind hierbei:

#### a) Gemeinsame HF-Hardware

Legt man die Signalpfade für die Winkelschätzung breitbandig aus, kann ein separates Empfänger-Frontend für die Abstandsmessung entfallen. Während der Abstandsmessung würde dann nur ein Kanal des Frontends genutzt werden und bei der Winkelmessung könnten weiterhin alle Kanäle eingesetzt werden.

#### b) Gemeinsame Digitalhardware

Zur Schätzung von Winkel und Abstand kann dieselbe Digitalhardware genutzt werden. Hierzu wird bei breitbandigen Signalen je ein komplexer oder zwei reelle AD-Wandler pro Kanal benötigt, sowie ein entsprechendes breitbandiges, mehrkanaliges Frontend. Ein

einzelnes FPGA oder ein DSP genügen, um die gemeinsamen Berechnungen durchzuführen.

#### c) Gemeinsame Signalverarbeitung

Die Schätzung von Winkeln von ankommenden Signalen kann zum einen mittels klassischer Periodogramm-basierter Verfahren erfolgen, oder mithilfe von parametrisierten hochauflösenden Techniken durchgeführt werden. Ein Periodogramm-basiertes Verfahren lässt sich mittels einer diskreten Fourier Transformation (DFT) umsetzen, welches z.B. durch den bekannten Algorithmus der schnellen Fourier Transformation (FFT) von Cooley und Tukey auch eine extrem effiziente Implementierung zulässt. Dieser Algorithmus ist zudem auch für eine Implementierung einer zyklischen Korrelation verwendbar, die in der derzeitigen Umsetzung der Matched-Filter-basierten Ankunftszeitbestimmung in einer etwas anderen Form (und dabei auch nur zum Teil zyklisch) durchgeführt wird.

#### 2.3.1.2 Schnittstelle Fahrzeuganwendungen

Einer der Arbeitspunkte des SIZEDN bestand in der Konzeption und im Aufbau einer Kommunikation zwischen den Modulen der Ortungseinheit und der Fusionseinheit. Diese Schnittstelle ist verantwortlich für den Datenaustausch von Messergebnissen und bietet dem Fahrzeug zudem die Möglichkeit das Ko-TAG System zu steuern. So können über diese Schnittstelle einzelne SafeTAG für die Ortung priorisiert werden, um die verfügbaren Ressourcen optimal auszunutzen. Die Schnittstelle definiert hierzu einzelne Nachrichten, die zwischen den Kommunikationspartnern im System versendet werden können. Basis für diese Protokollbeschreibung ist die Spezifikation des von Fraunhofer IIS bereit gestellten LocOn Protokolls.

Die für die Kommunikation zwischen der Ortungseinheit und der Fusionseinheit erforderlichen Nachrichten lassen sich nach drei Verwendungszwecken einteilen:

- Nachrichten die zur Steuerung der Ortungseinheit dienen.
- Nachrichten zur Verwaltung der SafeTAGs im Funk-Netzwerk
- Nachrichten zur Übertragung von Ergebnissen der Winkel- und Abstands-Messungen und der Inertialsensoren-Daten.

Alle definierten Nachrichten sind aufgabenspezifisch auf Basis der allgemein verwendbaren LocOn Nachrichten definiert. Abbildung 40 zeigt einer Übersicht der Nachrichten mit logischer Gruppierung.

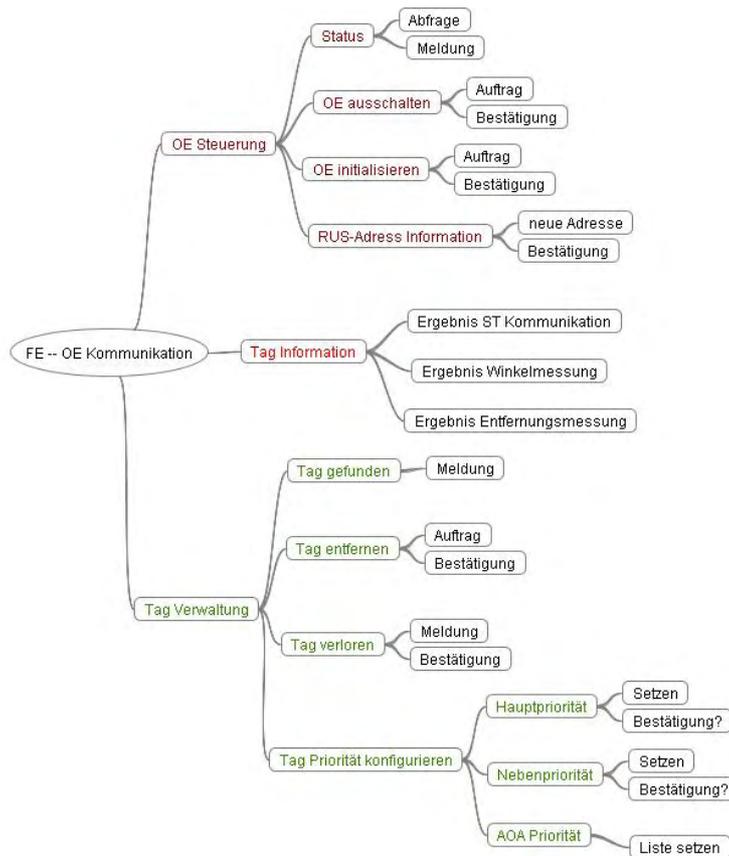


Abbildung 40: Übersicht der Nachrichten zwischen Ortungs- und Fusionseinheit

## 2.3.2 Abstandsmesssystem

### 2.3.2.1 Evaluierung Miniaturisierungskonzepte

Der Ausgangspunkt für die Entwicklungen im Projekt Ko-TAG war die Ortungstechnologie des Vorprojekts AMULETT, in der ein Transponder eine Größe von 25x18x10 cm aufwies. Die erste realisierte Prototypversion der SafeTAG-Systeme sollte deutlich kleiner werden, um zu zeigen, dass eine Miniaturisierung möglich ist. Hierzu wurden verwendbare Bauteile recherchiert, und ein Groblayout angelegt, in dem die Größe und Position der wichtigsten Bauteile der Transponder abgeschätzt und geplant wurden. Um die Möglichkeiten für Messungen und Fehlersuche bei der Weiterentwicklung nicht zu sehr einzuschränken, wurde entschieden, Frontend und Digitalteil der Transponderhardware getrennt aufzubauen und als Module über Steckverbinder zu verbinden. Nachdem die Entwicklung des SafeTAG 1.0-Systems abgeschlossen war, betrug die Transpondergröße nur noch rund ein Drittel der AMULETT-Größe, nämlich etwa 6x13x10cm.

### 2.3.2.2 Optimierte Bandbreitennutzung

Der Ausgangspunkt der Pulskompression ist die Erzeugung eines digitalen, pulsmodulierten Codesignals. Als Codes werden hierfür Maximalfolgen verwendet. Diese besitzen eine von Nebenmaxima freie Autokorrelation. Zu Beginn eines Messzyklus wird die Codesequenz über einen Triggerimpuls der Systemclock initiiert und im Anschluss daran wird jeder Codewert mit der Sendesignal-Impulsform gewichtet.

In einer realen Implementierung ist die Optimierung der Signalimpulsform meist durch die Geschwindigkeit der AD und DA Wandlung begrenzt. Als technisch einfachere Implementierung wird deshalb die Kombination einer niedriger abgetasteten Codefolge mit einer nachgeschalteten im DA Wandler implementierten Interpolationseinheit (Interpolationsfilter) verwendet.

Die Auflösbarkeit mehrerer ankommender Signale (insbesondere auftretend durch Mehrwegreflektionen), welche für die hochgenaue Abstandsmessung insbesondere im Straßenverkehr sehr wichtig ist, hängt unmittelbar mit der Bandbreite der verwendeten Signale zusammen. Je mehr Bandbreite hierzu zur Verfügung steht, desto besser lassen sich mehrere ankommende Signale voneinander unterscheiden. Da jedoch nur ein begrenzter Frequenzbereich zur Messung zur Verfügung steht, wurden dazu verschiedene Verfahren und Signalformen untersucht, um den gegebenen Spektralen Bereich möglichst effizient auszunutzen.

Zusätzlich wurde das System so ausgelegt, dass verschiedene Signale zur Messung verwendet werden können. So kann die Performanz mit den entwickelten Systemen bei verschiedenen Bandbreiten nicht nur simulativ, sondern zusätzlich auch in realen Messungen analysiert werden.

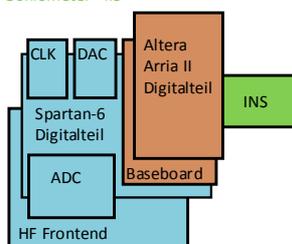
### 2.3.2.3 Erstellung Prototyp Abstandsmesssystem

Die Transponder und Ortungseinheiten der SafeTAG 2.0-Reihe sind eine Gemeinschaftsentwicklung der Forschungspartner TUM, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), Fraunhofer Heinrich Hertz Institut (HHI), sowie des Steinbeis Transferzentrums für Embedded Design und Networking (STZ). Die TUM war im Rahmen der Transponderneuentwicklung für alle die Abstandsmessung und Funkübertragung betreffenden Komponenten sowie für das Gehäuse und die Stromversorgung zuständig. Das IIS entwickelte das Inertialsensorik-Modul im Transponder sowie die Winkelmesseinrichtung in der Ortungseinheit, das STZ und HHI waren zuständig für die Entwicklung des Systemcontrollers und der OFDM-Datenkommunikation.

Aufgrund des weitgehend symmetrischen Hardwaredesigns wurden die Komponenten Digitalboard, HF-Frontend, AD- und DA-Wandler, Clock-Modul und Altera-FPGA samt Baseboard auch in der fahrzeugseitigen Ortungseinheit eingesetzt, wodurch Entwicklungs- und Produktionskosten eingespart werden konnten.

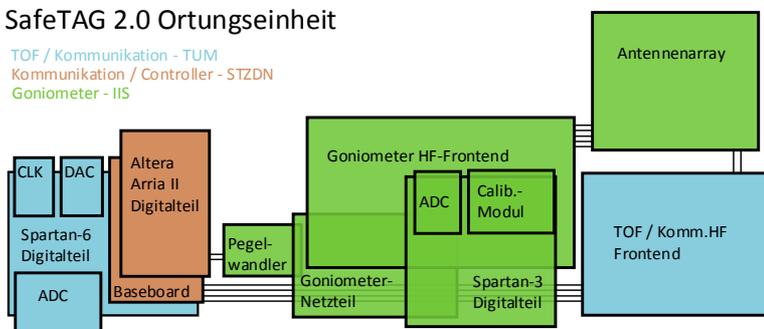
#### SafeTAG 2.0 Transponder

TOF / Kommunikation - TUM  
Kommunikation / Controller - STZDN  
Goniometer - IIS



#### SafeTAG 2.0 Ortungseinheit

TOF / Kommunikation - TUM  
Kommunikation / Controller - STZDN  
Goniometer - IIS



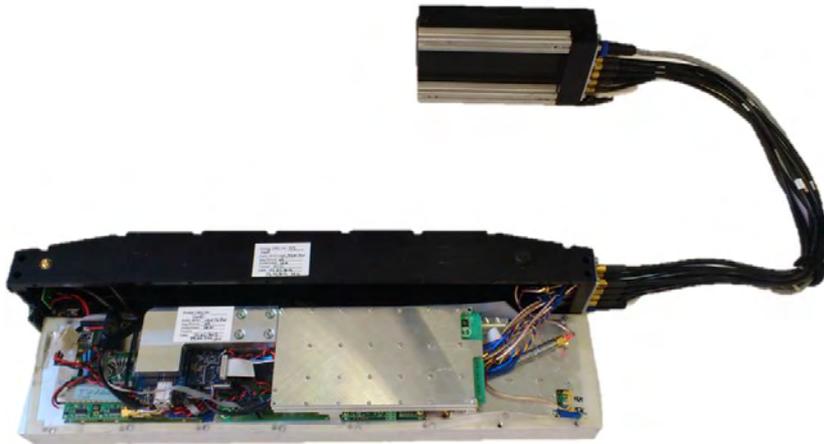


Abbildung 41: Ortungseinheit des SafeTAG 2.0 Systems

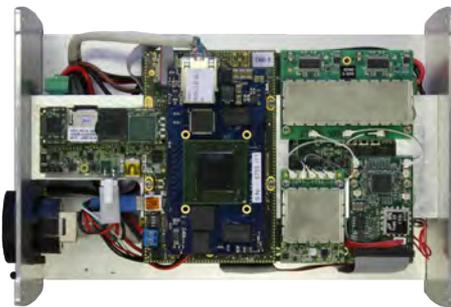


Abbildung 42: Geöffneter Transponder

### 2.3.3 Goniometer

Das Goniometer stellt die Einheit zur Richtungsschätzung eines Transpondersignals dar. Kombiniert mit der Abstandsmessung kann somit die relative Position des Transponders zum Fahrzeug berechnet werden. Das Goniometer hat keine eigenständige Signalerkennung, d.h. diese Einheit wird extern von der Kommunikationseinheit getriggert wenn ein Signal eines zu Ortenden Transponders erwartet wird. Deshalb kann die Winkelschätzung auf einem beliebigen Teil des Daten- und Kommunikationssignals durchgeführt werden, für Testzwecke wurde dem Datenpaket ein Sinussignal angehängt – dem sogenannten AoA Tail – das nur zur Richtungsschätzung verwendet wurde. (siehe Abbildung 43) .

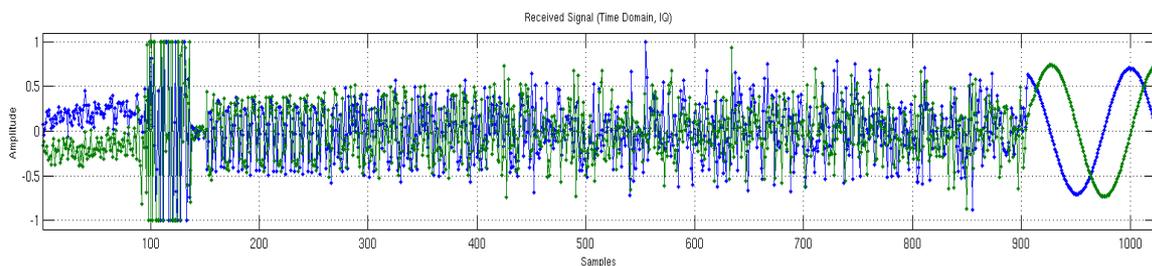


Abbildung 43: Datenpaket mit angehängten AoA Tail

#### 2.3.3.1 Miniaturisierung Goniometer

Die einzelnen Komponenten des Goniometers wurden im Vergleich zu dem Amulett- Vorgänger minimiert. So wurde die digitale Signalverarbeitung vollständig auf einem minimierten Digitalboard implementiert und nicht wie im Vorgängersystem die komplette Richtungsschätzung auf einem 19" Server. Aufgrund des 5.8 GHz Frequenzbandes konnte ein kleineres Antennenarray entwickelt werden.

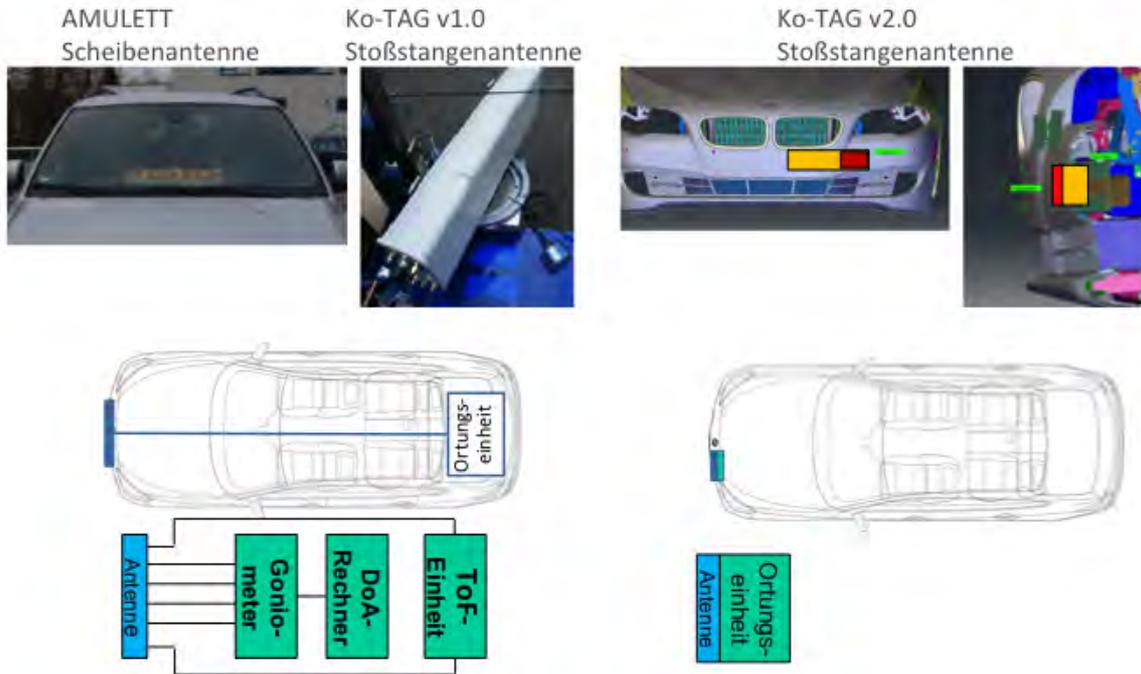
Für die Prototypenentwicklung wurden Kommunikationsmodul, On-Board-Unit, Winkelschätz- und Time-of-Flight Einheit getrennt voneinander aufgebaut und mit externen Schnittstellen verbunden. Des weiteren wurde das Gehäuse des Systems so spezifiziert, dass es in einen Stossfänger verbaut werden und die entstehende Wärme abführen kann. Daraus resultiert eine Größe der Ortungseinheit von 12x12x80cm.

Abbildung 44 zeigt die Ortungseinheit mit abgesetzter Antenneneinheit. Optional kann die Antenneneinheit direkt an die Ortungseinheit montiert werden.



**Abbildung 44: Ortungseinheit mit abgesetzter Antenneneinheit**

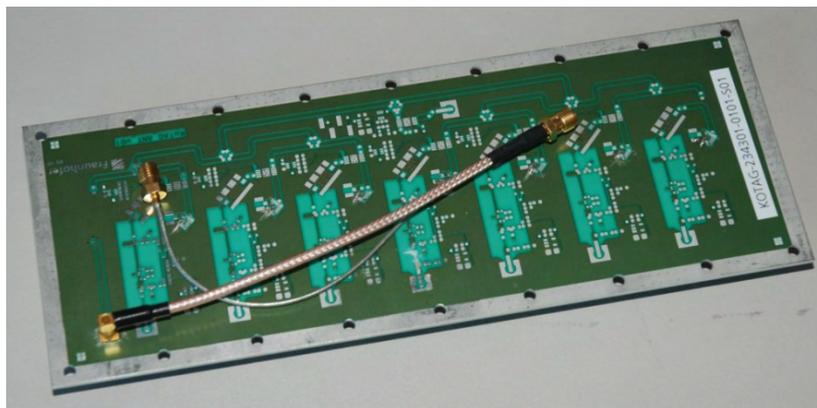
In Abbildung 45 ist der Platzbedarf der verschiedenen Entwicklungsstufen gut sichtbar. Während das AMULETT und SAFETAG 1.0 System externe Anbauten an die Stoßstange und eine 19" Ortungseinheit im Kofferraum benötigten, kann das SAFETAG 2.0 System komplett in die Stoßstange integriert werden.



**Abbildung 45: Integration der verschiedenen Entwicklungsstufen**

### 2.3.3.2 Antennenarray VRU Schutz

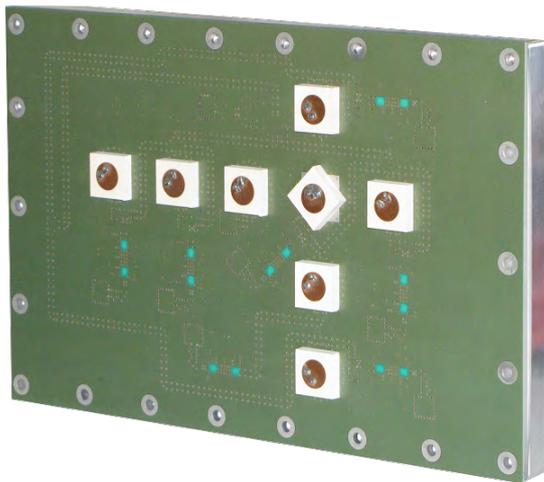
Im Laufe des Projektes wurden zwei verschiedene Antennenarrays gebaut. Zum einen ein lineares Array zur reinen Azimut Schätzung. Dieses Array besteht aus acht Elementen, die inneren sechs Elemente werden zur Richtungsschätzung verwendet, die zwei äußeren Elemente werden für die Kommunikation und Abstandsmessung verwendet (siehe Abbildung 46).



**Abbildung 46: 1D- Antennenarray**

Um auch Sondersituationen (z.B. ein verletzlicher Verkehrsteilnehmer steht auf einer Brücke) wurde ein weiteres Antennenarray entwickelt, mit dem es möglich ist, neben der Azimut Schätzung auch eine Elevationsschätzung durchzuführen.

Dieses Array besteht aus acht Elementen (Abbildung 47). Die Elemente I,II,IV,V werden zur Azimut Schätzung verwendet, die Elemente VI,IV und VIII zur Elevationsschätzung. Die Element III und VII werden für die Kommunikation und für die Abstandsmessung verwendet.



			VIII	
			VII	
I	II	III	IV	V
			VI	

Abbildung 47: 2D-Antennenarray

### 2.3.3.3 Erhöhung Störfestigkeit

Um die Winkelmessperformance zu verbessern, wurden drei unterschiedliche Lösungsansätze erprobt. Die Trennbarkeit der Winkel konnte durch ein wesentlich größeres Array verbessert werden. Auf Grund der angestrebten Miniaturisierung ist dieser Ansatz jedoch keine geeignete Lösung. Mit der Verwendung einer deutlich höheren Bandbreite wurde eine verbesserte zeitliche Trennbarkeit der Signale erreicht. Diese Option ist jedoch wegen der systembedingten Bandbreitenbeschränkungen in dem Ko-TAG Goniometer (Bandbreite ca. 4 MHz) nicht durchführbar gewesen.

Die Verwendung einer optimierten Algorithmik hingegen, verbessert die Winkelmessperformance erheblich und stellt somit einen realisierbaren Lösungsansatz dar. Um die Algorithmik zu optimieren, wurden Tests mit verschiedenen Algorithmen durchgeführt. Esprit, Unitary Esprit und Mean phase increment brachten keine signifikante Verbesserung zum bisher verwendeten MUSIC Verfahren. Jedoch konnte durch Spatial Smoothing eine erhebliche Besserung der Winkelmessperformance erreicht werden.

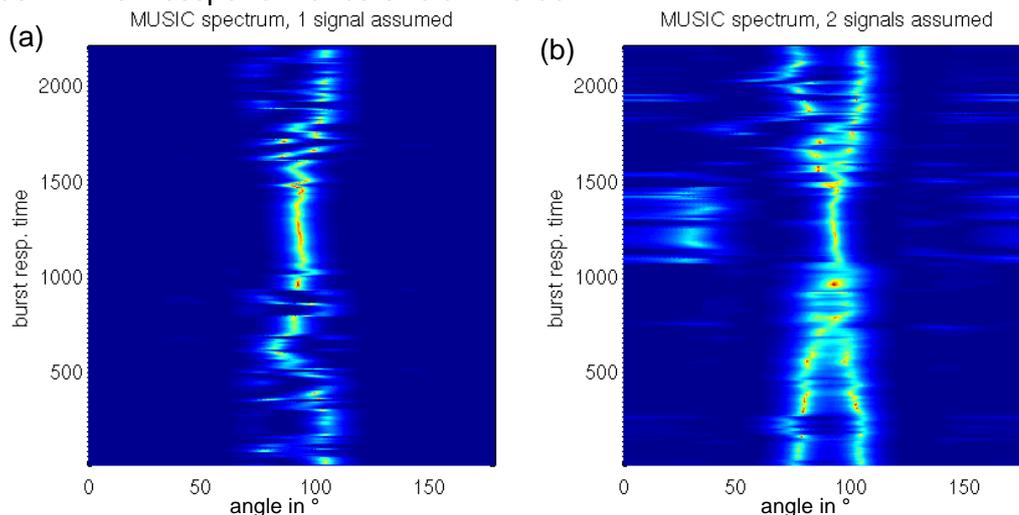
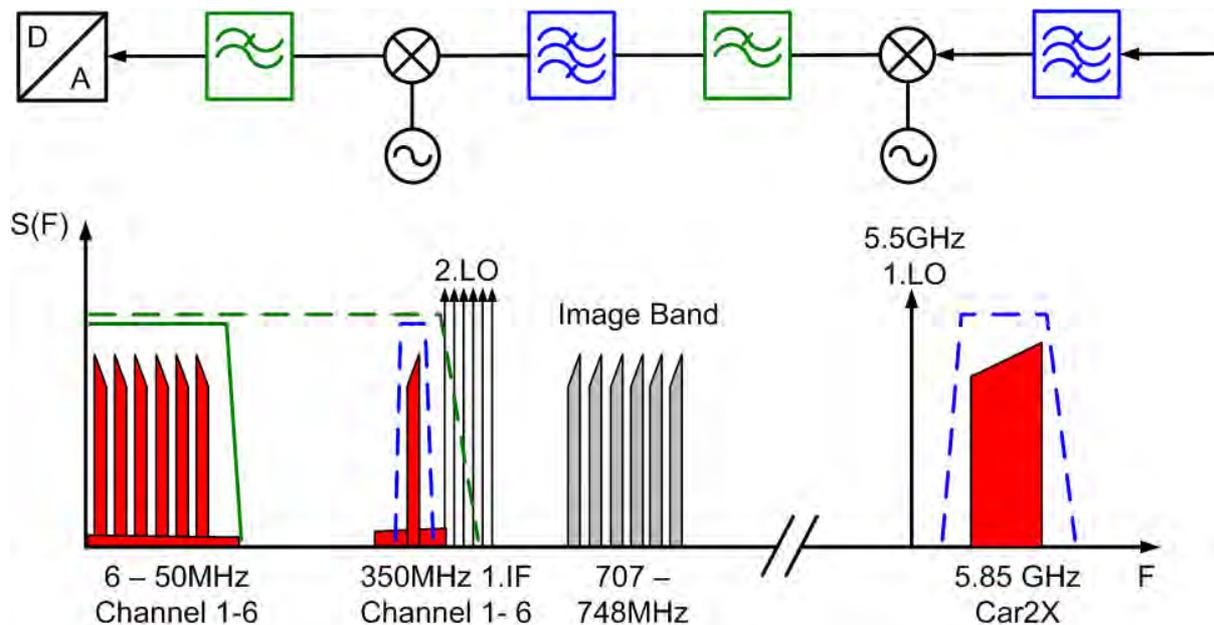


Abbildung 48: MUSIC-Spektren mit vorwärts-rückwärts Glättung ( $N_a = 5$ ) für die Annahme eines Signals (a) und die Annahme zweier Signale (b)

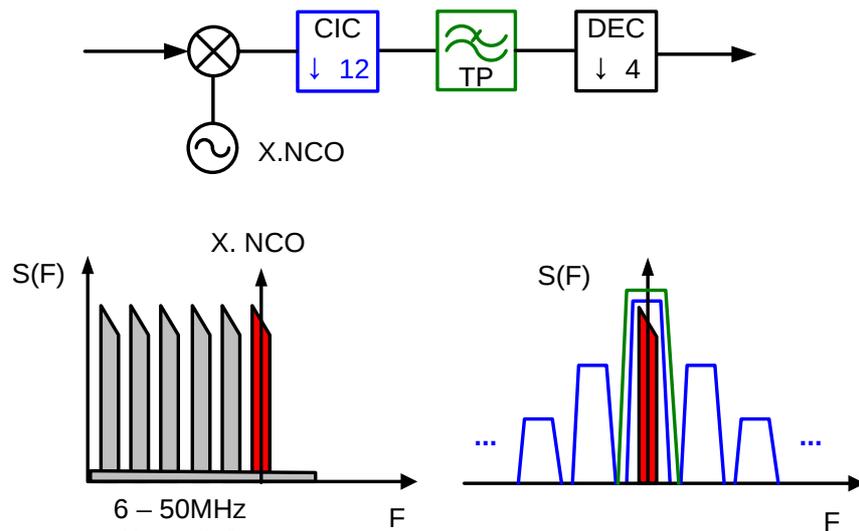
### 2.3.3.4 Erstellung Prototyp Goniometer

Der Empfänger des vorhandenen Schmalbandwinkelschätzers arbeitet nach dem Prinzip eines Doppelsuperheterodyn-Empfängers. Hierbei wird das Eingangssignal zunächst auf eine Zwischenfrequenz gemischt und dort Bandpass gefiltert. Danach wird es auf eine weitere Zwischenfrequenz gemischt, welche je nach Kanal variiert. Diese Variation geschieht mittels unterschiedlicher zweiter Mischfrequenz. Anschließend werden alle Kanäle kombiniert und über einen einzigen Analog-Digital-Konverter quantisiert, so dass dieser ein Mehrträger-signal abtastet. Abbildung 49 zeigt die Lage der Zwischenfrequenzen bis zur Quantisierung eines Empfängers der seine Eingangsfrequenz bei 5,8 GHz hat.



**Abbildung 49: Frequenzplan 6 Kanal Goniometer mit einem ADC**

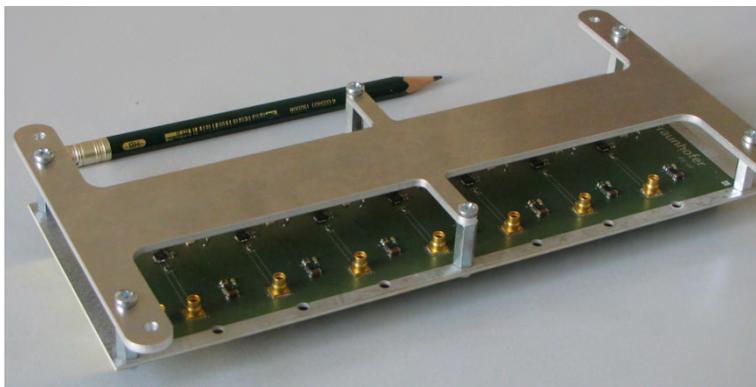
Da bei der beschriebenen Empfängerarchitektur alle Kanäle auf Zwischenfrequenzen kombiniert vorhanden sind, müssen diese vor einer weiteren Verarbeitung oder Winkelschätzung erst wieder getrennt werden. Dies geschieht in der digitalen Signalverarbeitung, die Teil der FPGA-Firmware des Winkelschätzers ist. Nach einer Multiplikation mit einem numerischen Oszillator, der als Tabelle im Blockramm gespeichert ist, wird zunächst ins Basisband gemischt. Danach wird mittels eines (CIC-Filters Cascaded Integrator Comb - kaskadierter Integrator-Differentiator-Filter) das Signal gefiltert. Der Filter hat Tiefpasscharakteristik und reduziert zugleich die Samplingrate um den Faktor 12. Anschließend folgen noch eine Tiefpassfilterung sowie eine weitere Dezimationen um Faktor vier. Abbildung 50 zeigt den Aufbau der Verarbeitung. Nach dieser Kanaltrennung liegen die Kanäle wieder getrennt vor und können mittels Winkelschätzalgorithmen ausgewertet werden.



**Abbildung 50: Digitale Kanaltrennung**

#### 2.3.3.4.1 Analoge und digitale Signalverarbeitung (On-Board-Unit)

Die On-Board-Unit dient der Auswertung der analogen Eingangssignale aus dem Antennenarray. Innerhalb der On-Board-Unit wird hierzu zunächst der Winkel zum verletzlichen Straßenverkehrsteilnehmer geschätzt. Komponenten der On-Board-Unit sind ein Sechs-Kanal-Hochfrequenzempfänger, eine digitale Signalverarbeitungskette sowie Algorithmik und Firmware. In Kooperation mit den Projektpartnern kann dann aus der Datenfusion die exakte Position des Verkehrsteilnehmers bestimmt werden.



**Abbildung 51: HF-Frontend-Unit**

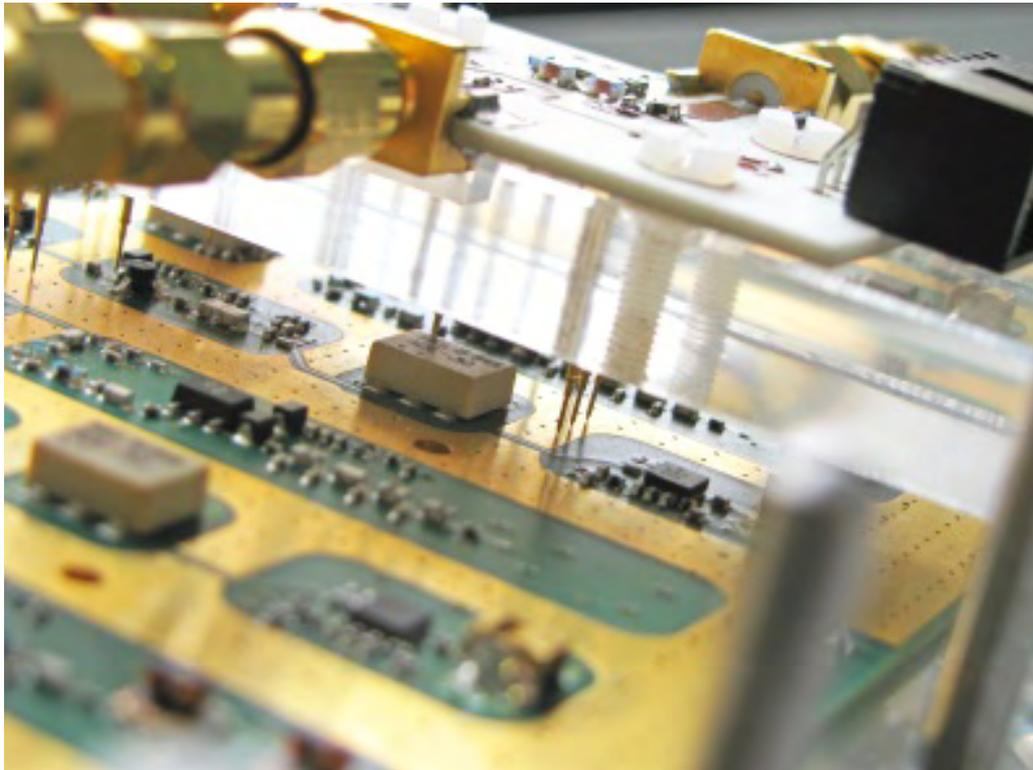
#### 2.3.3.4.2 Digitalboard

Für das Digitalboard wurde eine Kombination aus einem TI64xx DSP und einem Spartan 3A FPGA gewählt, wodurch eine Kostenreduktion im Vergleich zur ersten Version von KoTAG erreicht wurde. Somit konnte eine 100-fache Performancesteigerung erreicht werden, welche sich bei geeignetem FW/SW Design noch erhöhen könnte.



**Abbildung 52: Digitalboard basierend auf einem Spartan 3A-DSP und Ti64xx DSP**

#### 2.3.3.4.3 HF Frontend



**Abbildung 53: HF-Frontend**

Der doppel-superheterodyn aufgebaute 6 Kanälempfänger erlaubt eine Eingangsfrequenz von 5,77 GHz bis 5,97 GHz. Mit einer Bandbreite von 2,5 MHz /4,5 MHz erreicht der Empfänger einen Eingangspegel von -110 dBm bis -2dBm.

## 2.4 Integration Ortungs- und Kommunikationskonzept

### 2.4.1 Architektur

#### 2.4.1.1 Safety und Security in einem integrierten Konzept

Für das vom SIZEDN definierte Funkprotokoll wurde ebenfalls eine Sicherheitsarchitektur konzeptioniert, mit der insbesondere die Funkkommunikation abgesichert werden kann. Die Komponenten und Mechanismen der Sicherheitsarchitektur ermöglichen es, die Integrität und Privatheit der Daten sowie die Authentizität und Nicht-Verfolgbarkeit der Teilnehmer zu gewährleisten. Um eine Kompatibilität zu anderen Car2X Projekten zu ermöglichen, werden die Vorgaben aus den relevanten Standards und Vorprojekten berücksichtigt.

Die konzipierte Sicherheitsarchitektur wurde als Erweiterung der vorhandenen Firmware der Ko-TAG Geräte implementiert und verifiziert.

##### 2.4.1.1.1 Literaturrecherche

Ein wichtiges Kriterium im Ko-TAG Projekt ist die Interoperabilität mit anderen Systemen im Car-to-X (C2X) Bereich. Deshalb wurde eine umfangreiche Literaturrecherche der vorhandenen Standards und relevanten Vorgängerprojekte im Sicherheitsbereich durchgeführt. Als besonders wichtig erschienen dabei der IEEE1609.2 Standard und die beiden Vorgängerprojekte Secure Vehicular Communication (SeVeCom) und Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland (simTD). Der IEEE1609.2 Standard definiert einige Sicherheitsmechanismen und die zu verwendenden kryptografischen Algorithmen. Durch die beiden Vorprojekte SeVeCom und simTD konnte eine grobe Übersicht über die aktuell vorherrschenden Sicherheitsarchitekturen im C2X Bereich erlangt werden.

##### 2.4.1.1.2 Anforderungsanalyse

###### 2.4.1.1.2.1 Risikoanalyse

Für eine genaue Definition der Anforderungen an die Sicherheitsarchitektur wurde eine umfangreiche Risikoanalyse durchgeführt. Diese ist in drei Phasen untergliedert. In Phase eins wurden Schwachstellen im Ko-TAG System identifiziert, an denen eine Attacke erfolgen kann. Aufbauen darauf wurden in Phase zwei potentielle Bedrohungen, wie beispielsweise das Manipulieren übertragener Daten oder der Identitätsdiebstahl, spezifiziert. In der abschließenden dritten Phase wurde das Risiko für das System durch die einzelnen Bedrohungen bewertet.

###### 2.4.1.1.2.2 Anforderungen

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und der Risikoanalyse wurden detaillierter Anforderungen an die Sicherheitsarchitektur spezifiziert. Im Wesentlichen sind dies:

- Vertraulichkeit
- Integrität
- Verfügbarkeit
- Authentizität
- Verbindlichkeit
- Privatheit und Nicht-Verfolgbarkeit

##### 2.4.1.1.3 Konzept Sicherheitsarchitektur

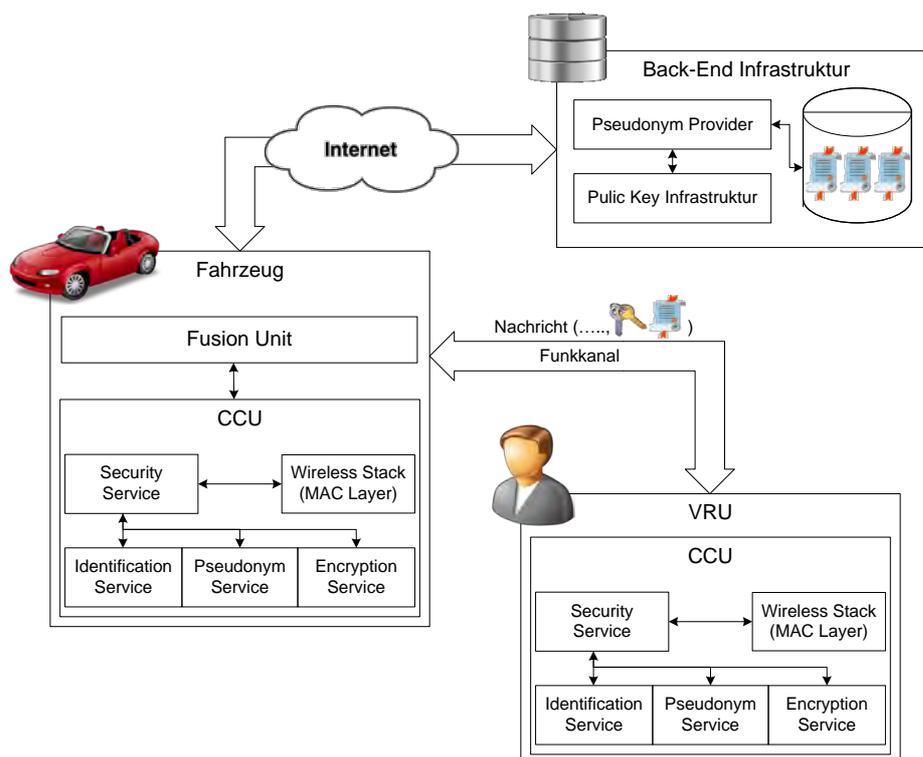
###### 2.4.1.1.3.1 Architektur

Der Schwerpunkt der Sicherheitsarchitektur liegt auf der Privatheit und der Authentizität der Daten und Teilnehmer im Funknetzwerk. Die Architekturen und Mechanismen aus den C2X

Standards und den relevanten Vorprojekten müssen dafür um einige Funktionalitäten erweitert werden. Der größte Unterschied dieser Sicherheitsarchitektur, zu den bestehenden Architekturen, liegt dabei in der Integration von VRUs, die keine direkte Verbindung zu Elementen außerhalb des Funknetzwerks aufweisen.

Abbildung 54 zeigt das grundlegende Konzept der Sicherheitsarchitektur. Die aus dem Ko-TAG System bereits bekannten Geräteklassen, Fahrzeuge (On Board Unit (OBU)) und Vulnerable-Road-User (VRU)s (STs), sind um eine Back-End Infrastruktur erweitert worden, welche über eine Internetverbindung erreichbar ist. Die Back-End Infrastruktur ist für die Verwaltung der Identitäten der Teilnehmer notwendig und beinhaltet für diesen Zweck eine Public Key Infrastruktur (PKI). Alle Teilnehmer besitzen eine Basisidentität für die Authentifizierung bei der Back-End Infrastruktur und ein Pseudonym für die Ko-TAG Funkkommunikation. Die Vergabe der Pseudonyme wird von einem zentralen Pseudonym Provider (PP) geregelt, welcher ebenfalls in der Back-End Infrastruktur enthalten ist.

Die Sicherheitskomponenten für Fahrzeuge und VRUs sind nahezu identisch. Der Pseudonym Service (PS) stellt gültige Pseudonyme bereit und verwaltet Identitäten. Mit dem Identification Service (IS) werden eingehende Funknachrichten verifiziert, sowie ausgehende Nachrichten signiert. Nachrichtentypen, deren Inhalt vertraulich ist, werden vom Encryption Service (ES) ver- und entschlüsselt. Alle diese Sicherheitsdienste werden vom Security Service (SS) kontrolliert und gesteuert, sowie anderen Softwarekomponenten bereitgestellt.



**Abbildung 54: Sicherheitsarchitektur**

#### 2.4.1.1.3.2 Identitäten

Jeder Netzwerkteilnehmer besitzt zwei Identitäten. Dies ist zum einen die Basisidentität. Über diese, im Ko-TAG Netzwerk einmalige Identität, kann der Teilnehmer von der Back-End Infrastruktur zu jeder Zeit eindeutig identifiziert werden. Es kann also ermittelt werden, ob ein Teilnehmer einem Netzwerk beitreten darf oder nicht. Die Basisidentität wird als Zertifikat von der PKI ausgestellt und muss vor der ersten Benutzung generiert werden.

Zum anderen braucht jeder Teilnehmer eine Identität für die Authentifizierung im Ko-TAG Funknetzwerk. Diese basiert auf dem Prinzip der Pseudonyme. Ein Pseudonym ist eine nur

für sehr kurze Zeit gültige Identität, über die kein Rückschluss über den Besitzer erfolgen kann. Es besteht aus einem IEEE1609.2 Zertifikat.

#### *2.4.1.1.3.3 Public Key Infrastruktur*

Die PKI stellt Zertifikate aus, verteilt und verifiziert diese. Sie ist damit ein zentraler Baustein, um die Schutzziele der Authentizität und Integrität zu erlangen. Die PKI beinhaltet eine Registration Authority, Certification Authority und Validation Authority. Die PKI wird für die Zertifizierung von Basisidentitäten und von Pseudonymen verwendet. Die Verwaltung der Identitäten ist jedoch in den PP ausgelagert. Es wird das Zertifikatsformat IEEE1609.2 verwendet.

#### *2.4.1.1.3.4 Pseudonym Provider*

Der Pseudonym Provider ist für die Verwaltung von Pseudonymen und Basisidentitäten zuständig. Er ist die einzige Instanz, die ein Mapping zwischen den beiden Identitäten herstellen kann. Bei der Beantragung von neuen Pseudonymen bei der PKI, prüft der PP ob die Basisidentität des Antragstellers gültig ist.

#### *2.4.1.1.3.5 Identification Service*

Der Identification Service ist eine Sicherheitskomponente in Fahrzeugen und VRUs und ist für die Signierung und Verifizierung von Funknachrichten zuständig. Dazu wird das Verfahren Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA) 256 Bit verwendet.

#### *2.4.1.1.3.6 Encryption Service*

Der Encryption Service ist eine Sicherheitskomponente in Fahrzeugen und VRUs und ist für die Ver- und Entschlüsselung von Funknachrichten zuständig. Es werden alle Unicast Nachrichten verschlüsselt. Dazu wird das symmetrische Verschlüsselungsverfahren Advanced Encryption Standard (AES) mit einer Schlüssellänge von 128Bit verwendet. Der symmetrische Schlüssel wird mit dem öffentlichen Schlüssel aus dem Pseudonym des Empfängers verschlüsselt.

#### *2.4.1.1.3.7 Pseudonym Service*

Der Pseudonym Service ist eine Sicherheitskomponente in Fahrzeugen und VRUs und ist für die Verwaltung der Identitäten zuständig. Zu seinen Aufgaben gehört das Beantragen einer neuen Basisidentität oder von Pseudonymen bei der PKI und das Koordinieren des Pseudonym Wechsels.

#### *2.4.1.1.3.8 VRU Back-End Infrastruktur Kommunikation*

Bei einem VRU stellt die Kommunikation mit der Back-End Infrastruktur ein Problem dar. Da ein VRU keine Internetverbindung besitzt, kann es keine direkte Verbindung zu der Back-End Infrastruktur aufbauen. Die Kommunikation mit dieser muss deshalb über ein Fahrzeug stattfinden. Alle Anfragen nach neuen Pseudonymen oder einer Basisidentität werden von einem VRU an ein Fahrzeug gesendet. Das Fahrzeug leitet die Anfrage an die Back-End Infrastruktur weiter. Der Rückweg findet ebenfalls über das Fahrzeug statt.

### *2.4.1.2 Protokollanpassungen für Infrastrukturanwendungen*

SEines der Ziele des Ko-TAG Projektes war es, Infrastrukturelemente mit in das System einzubringen. Durch das Einbringen der Verkehrsinfrastruktur in das Ko-TAG Protokolldesign wird es sowohl ermöglicht verschiedene Problemstellungen zu adressieren, als auch die Performance des Systems zu erhöhen. Dabei haben Infrastrukturanwendungen erhebliche Vorteile gegenüber den mobilen Netzteilnehmern:

- Die Verkehrsinfrastruktur verfügt über eine konstante Stromversorgungsquelle und kann somit leistungsintensiver arbeiten.
- Durch den Einsatz gerichteter Antennen kann eine optimale Funkfeldabdeckung erreicht werden.

- Sie kann über weitere Anbindungen zu externen Systemen (z.B. Internet) verfügen und somit weitere Informationen bereitstellen/abrufen.
- Aufgaben können aufgeteilt und somit optimiert abgearbeitet werden (z.B. mehrere verbundene Ko-TAG Systeme an einer Ampelanlage)

Somit können verschiedene Anwendungsszenarien durch die Einbringung von Infrastrukturelementen adressiert werden.

#### 2.4.1.2.1 Eigenlokalisierung

In der Verkehrsinfrastruktur verbaute SafeTAGs können die Eigenlokalisierungsfunktionen von Ortungseinheiten unterstützen. Dies wird prinzipiell dadurch ermöglicht, dass diese TAGs fest verbaut sind, und ihre Position somit exakt ausgemessen werden kann. Diese ausgemessene Position wird als spezielle Datennachricht des Ko-TAG Protokolls an die Ortungseinheiten gesendet.

Die Ortungseinheit verfügt somit nach Abschluss eines vollständigen Kommunikationszyklus über

- den Abstand zu dem Infrastruktur SafeTAG,
- den Azimut und die Elevation zu dem SafeTAG,
- und die exakt ausgemessene Position des SafeTAGs.

Anhand dieser Informationen kann eine Eigenlokalisierung innerhalb der Ortungseinheit erfolgen. Eine höhere Anzahl an Infrastruktur SafeTAGs erhöht dabei die Genauigkeit der Lokalisierung, bzw. es können fehlerhafte oder fehlende Messwerte ausgeglichen werden.

#### 2.4.1.2.2 Meldung von Behinderungen und Gefahrenstellen

Temporäre Beeinträchtigungen des Straßenverkehrs können nur mit erheblicher Verzögerung in Navigationssystemen berücksichtigt werden, wobei Behinderungen in Städten und auf Landstraßen in der Regel nicht angezeigt werden. Die Infrastruktur-TAGs können dort als Warnbarken eingesetzt werden und zusammen mit ihrer Position auch die Art der Behinderung melden.

#### 2.4.1.2.3 Erweitertes Netzwerkmanagement

In der Infrastruktur verbaute SafeTAGs können das umliegende Netzwerk überwachen, steuern und konfigurieren, ohne selbst aktiv an den Ortungsprozessen teilzunehmen.

#### 2.4.1.2.4 Netzwerküberwachung

Infrastruktur SafeTAGs können den Netzwerkverkehr überwachen und die Netzteilnehmer entsprechend konfigurieren. Dies gilt hinsichtlich des Kontrollkanals, auf dem von den SafeTAGs zyklische Announcements versendet werden. Dadurch können die Auslastung des Funkkanals optimiert und die Anmeldezeiten reduziert werden.

#### 2.4.1.2.5 Adressvergabe

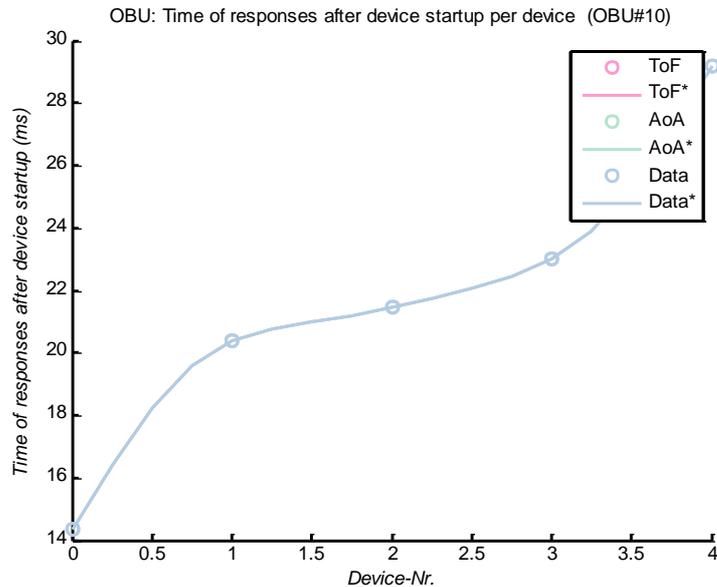
Eine weitere mögliche Infrastrukturanwendung stellt die Adressvergabe an die umliegenden SafeTAGs dar. SafeTAGs starten mit einer zufällig generierten Adresse, die evtl. nicht eindeutig ist. Damit die TAGs eindeutig identifizierbar sind, können Infrastruktur SafeTAGs eindeutige Adressen

- aus einem gemeinsamen Adresspool (z.B. Internetzugriff) abrufen und zuweisen
- oder ortsabhängige Adressen vergeben.

#### 2.4.1.3 Simulation und Vergleich möglicher Systemarchitekturen

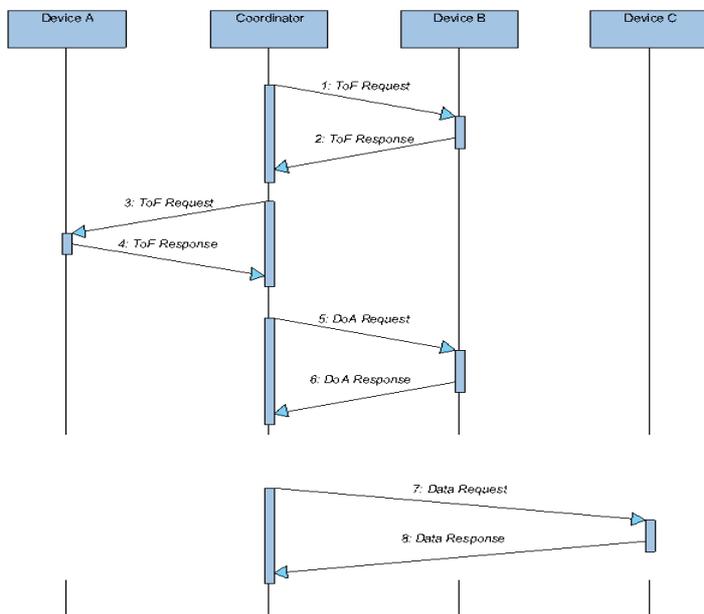
Mit Hilfe des verwendeten Simulators und der entwickelten Modelle war es möglich, Statistiken über die Architektur und die Implementierung eines Netzwerkes zu generieren. Zudem war es möglich weitere Netzwerkarchitekturen hinsichtlich deren Tauglichkeit für die Ko-TAG Anwendung zu prüfen. Wichtige Charakteristiken waren hierbei z.B. die Antwortzeiten des

Netzwerkes, die maximal mögliche Messfrequenz oder die Skalierbarkeit des Netzwerkes. Ein Ergebnis einer Simulation der Antwortzeit eines Netzwerkes mit zehn OBU und fünf VRUs wird in Abbildung 55 gezeigt.



**Abbildung 55: Simulierte Antwortzeiten eines Netzwerkes mit 10 OBUs und 5 VRUs**

In diesem Zuge wurde das aktuelle Ko-TAG Netzwerk (im folgende Netz-A), welches auf synchronisierten Zeitschlitzten basiert, gegen eine komplett wettbewerbsbehaftetet Architektur (im folgende Netz-B) verglichen. Hier stehen keine reservierten Kanalressourcen, wie Zeitschlitzte zur Verfügung, weder für die Datenkommunikation noch für Messungen. Dies macht den Einsatz einer Request-Response, wie in Abbildung 56 gezeigt erforderlich.



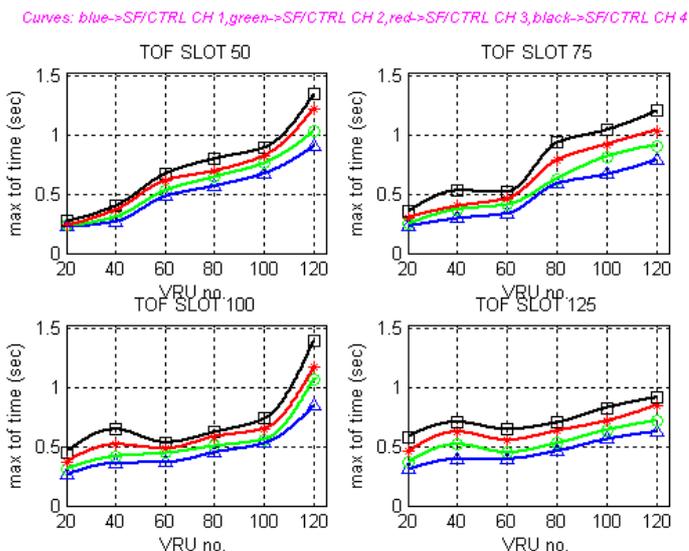
**Abbildung 56: Beispielhafter Ablaufs im Wettbewerbsbehafteten Ansatz**

Netz-B bietet hier gegenüber Netz-A einige Vorteile. Der Hauptvorteil besteht in der Einfachheit der Umsetzung. So können z.B. durch die Request-Response Architektur selektive Abfragen durchgeführt werden, was zu einer höheren Skalierbarkeit führt und die Möglichkeit bietet sehr granular einzelne Geräte zu priorisieren. Die Architektur bietet einen relativ niedrigen Grad an Komplexität hinsichtlich der Implementierung. Durch die schwachen Verbindungen entfallen aufwendige Abläufe für den Verbindungsaufbau und die Request Response Architektur vermeidet zeitliche Abhängigkeiten. Zudem wird keinerlei Synchronisierung vo-

rausgesetzt und der Kanalzugriffsmechanismus ist durch das verwendete CSMA-CA Verfahren sehr einfach geregelt.

Ein weiterer Vorteil des Netz-B stellt das gewählte Kanalmodell dar. Hier wird in Netz-B ein einzelner Kanal innerhalb des IEEE802.11p Standard für jegliche Datenkommunikation und Messung verwendet. Dies würde eine Integration in den bestehenden Standard vereinfachen.

Allerdings bringt Netz-B auch einige Nachteile mit sich. Vergleicht man die Simulationsergebnisse für Netz-B mit den Ergebnissen für Netz-A so fällt hier die niedrigere Performance des Netz-B auf. Aufgrund der strikt geregelten Kanalzugriffe in Netz-A können hier bessere Werte als bei der im Netz-B verfolgten Request-Response Architektur erzielt werden. Dieses Verhalten kann ebenfalls durch das in Netz-B erhöhte Datenaufkommen begründet werden.



**Abbildung 57: Ansatz – Maximale TOF-Antwortzeiten gemessen vom Startzeitpunkt der Geräte**

So zeigt der Vergleich zwischen Abbildung 57 und Abbildung 58, dass mit Netz-A eine niedrigere Antwortzeit für mehrere Geräte erreicht werden kann. Hier muss allerdings analysiert werden, ob diese Performance benötigt wird und die Komplexität des Ansatzes rechtfertigt.

Generell gilt es hier weitere Untersuchungen hinsichtlich der Tauglichkeit der Performance von Netz-B durchzuführen. Hier sind durchaus Werte zu erzielen, die für den hiesigen Anwendungsfall in Betracht gezogen werden können. Besonders bei den höher priorisierten Geräten zeigt hier die Simulation anwendbare Werte, wie in Abbildung 58 und Abbildung 59 zu sehen ist. Diese Werte können durch weitere Optimierung des Protokolls, oder auch z.B. durch eine Erhöhung der Datenrate erzielt werden. Demnach wäre bei hinreichender Performance ein vereinfachter Ansatz gegebenenfalls vorzuziehen.

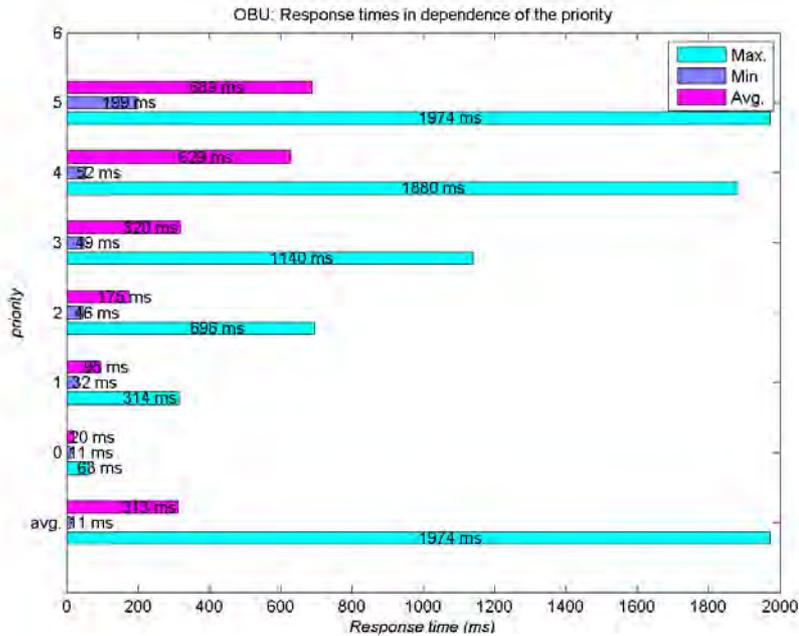


Abbildung 58: Netz-B (10OBUs-50VRUs) – Antwortzeiten gemessen vom Startzeitpunkt der Geräte

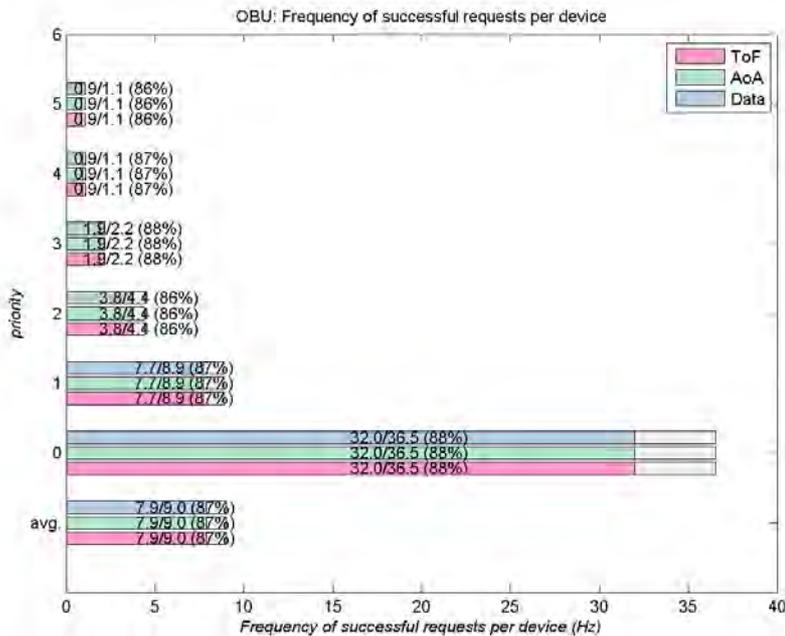
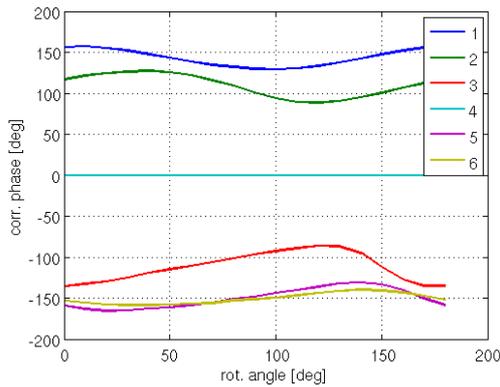


Abbildung 59: Netz-B (10OBUs-50VRUs) – Durchschnittliche Frequenz erfolgreicher Anfragen pro Gerät

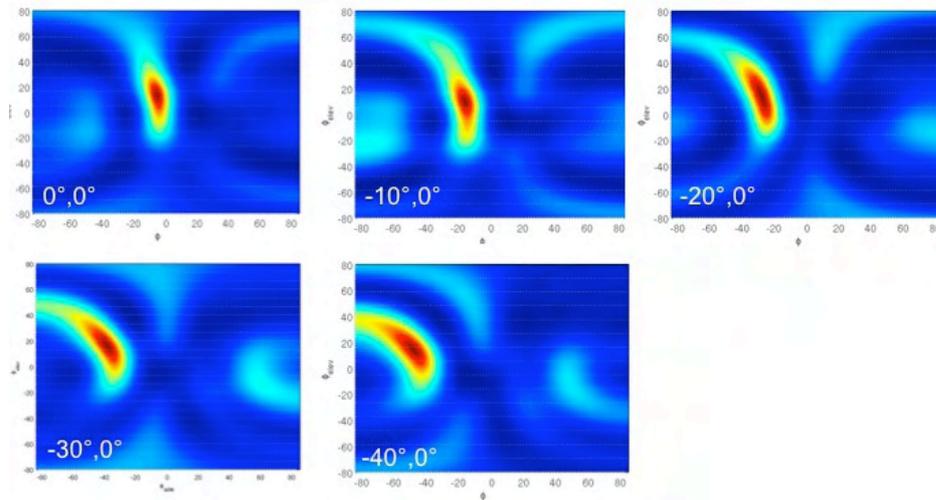
#### 2.4.1.4 Antennenintegration und Charakterisierung

Die Messungen mit der zwei-dimensionalen zirkular polarisierten Antenne ergibt starke Phasenverschiebungen der Signale von den einzelnen Antennenelementen, die stark von der Auslenkung des Senders in Azimut oder Elevation, der Polarisation des Senders sowie von der jeweiligen (eigentlich baugleichen) Antenne abhängen (Abbildung 60).



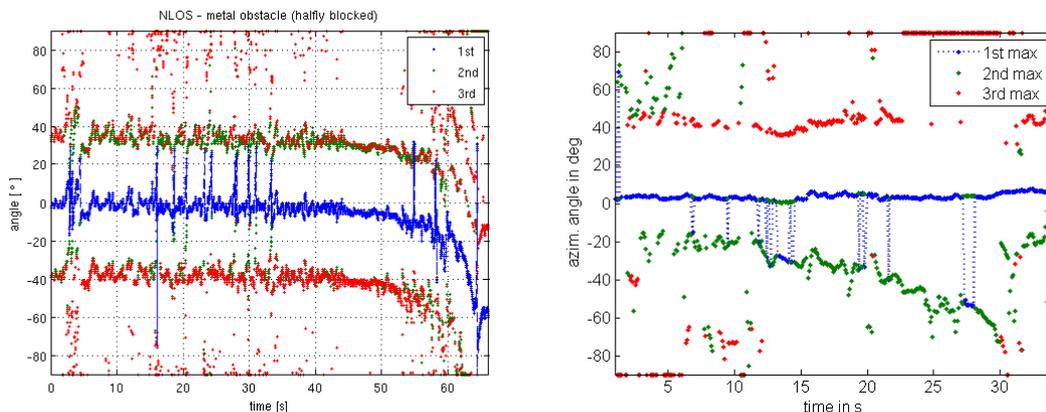
**Abbildung 60: Phasendifferenz zwischen den Antennenelementen abhängig von der Polarisati-on des Sendesignals**

Diese führen bereits in der Antennenhalle zu einer Aufspreizung der Maxima im MUSIC-Spektrum wie in Abbildung 61 zu sehen ist. Im Fall der Ausbreitung in realen Szenarien kann so bereits ein schwacher Mehrweg zu einer großen Messabweichung führen.



**Abbildung 61: Verzerrungen im 2D-MUSIC-Spektrum der zirkularen Antenne bei Azimut-Auslenkung des Senders in der Antennenhalle.**

Bei daraus resultierenden Messreihen bei 5.8 GHz zeigt sich, dass die Winkelverfolgung im Mittel möglich ist aber bei Verdeckung anfällig, insbesondere für den Fall der Halbverdeckung in Abbildung 62 (a) Es sind einerseits sehr große Schwankungen des Hauptmaximums des MUSIC-Spektrums festzustellen sowie außerdem extreme Ausreißer. Mit relativ einfachen Mitteln ist es aber möglich die resultierenden Aussetzer und Ausreißer des Schätzwertes zu reduzieren wie es in Abbildung 62(b) anhand einer zeitlichen Mittelung der Kovarianzmatrix und der Vorwärts-Rückwärts-Glättung demonstriert wird.



**Abbildung 62: Zufahrt des Schätzers auf (a) halbverdeckten und (b) viertelverdeckten Sender.**

In Abbildung 62(b) ist auch deutlich die Auflösung eines Mehrweges zu sehen, der sich aus Reflektionen an einer Mauer links des beweglichen Schätzers in ca. 10 m Abstand ergibt, wodurch sich der Einfallswinkel dieses Mehrweges bei Annäherung vergrößert. In der Entfernung sind beide Winkel relativ nahe beieinander, sodass sie dort nur sporadisch getrennt werden.

#### 2.4.1.5 Ausbau Funkkanalmesssystem

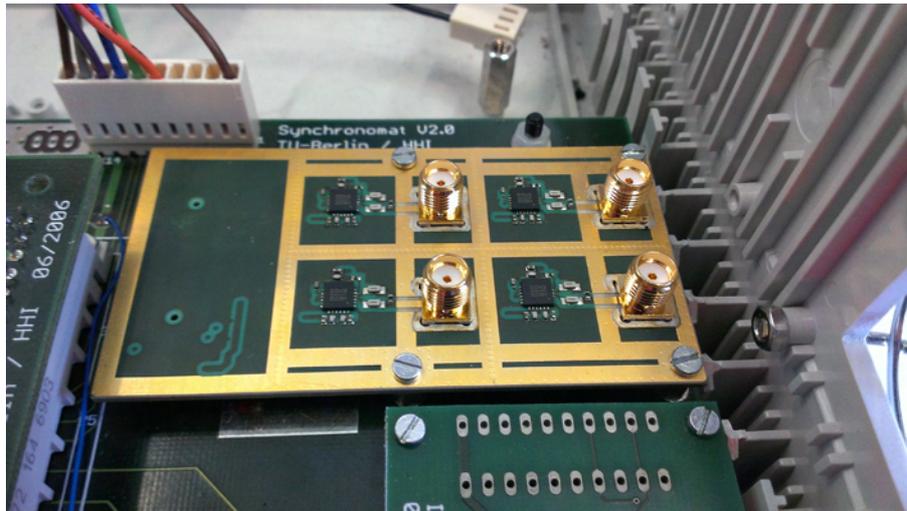
##### 2.4.1.5.1 Hochfrequenzsystem und weitere Systemkomponenten

Die Erweiterung des Hochfrequenzsystems des HHI-Channel-Sounders besteht hauptsächlich aus den folgenden Aspekten: Die Entwicklung und Integration zweier Komponenten 1) ein Modul für die Messung der Hochfrequenzleistung auf alle vier Kanäle gleichzeitig und 2) eine HF-Schaltergruppe, die den besonderen Anforderungen genügt, und der Entwicklung eines Antennenkalibrierungsverfahrens. Die Arbeiten am Hochfrequenzsystem sind mit der Integration eines vierten Datenaufzeichnungsmoduls der Inbetriebnahme und abschließenden Systemtests vervollständigt worden.

Für das Hochfrequenzleistungsmodul wurde als Hauptanforderung die parallele Vermessung von vier Kanälen vorgesehen. Weitere Rahmenbedingungen waren die festen Dimensionen, die von der Trägerleiterplatte festgelegt wird, und eine möglichst hohe Kanalisolation. Eine schlechte Isolation kann zu einer Fehlschätzung des aktuellen Leistungspegels führen und somit eine suboptimale Nutzung des dynamischen Aufnahmebereichs oder sogar eine Übersteuerung und Verfälschung der Messdaten. Unter diesen Anforderungen, wurde die Leiterplatte mit vier getrennten logarithmischen Detektoren bestückt, die einen großen Dynamikbereich von bis zu 60 dB mit einer Auflösung von 1 dB bei 6 GHz in einem entsprechenden DC Spannungssignal konvertieren können. Zur Platzoptimierung wurde dann ein vier-Kanal 12-bit A/D Wandler genutzt. Nach der Bestückung und dem Funktionstest, wurde eine metallische Abdichtung in Form einer Wand und eines entsprechenden Deckels vorgesehen. Diese Abdichtung dient der Abschirmung von der externen unerwünschten Hochfrequenz-Störleistung aus der Umgebung.

Die Integration umfasst den mechanischen Einbau mit der Herstellung der entsprechenden elektrischen Verbindungen sowie einer Anpassung der Steuereinheit-Firmware der automatischen Leistungsregelung. Die Firmware Anpassung beinhaltet eine Implementierung eines verbesserten Bussystems und die Anpassung an das Kommunikationsprotoll, sowie die Erweiterung der Algorithmen für Messung und Steuerung der Leistungsregelung. Abschließend wurde eine Speichererweiterung vorgenommen für die Sicherung der Leistungswerte im Messbetrieb. Die Erweiterung ist mit Hilfe eines gesonderten Moduls erfolgt, welches entwickelt und konstruiert wurde und ins System integriert.

Abbildung 63 zeigt das erstellte Modul während des Systemtests auf Funktionalität. Auf den Aussparungen an Löt-Stopp-Lack (d.h. die Bereiche mit metallisch-goldenen Farbe), wird anschließend eine metallische Wand angebracht und ein Deckel mit entsprechenden Aussparungen für die vier SMA-Anschlüsse.



**Abbildung 63: Modul zur Hochfrequenzleistung von vier Kanälen. Im Bild ohne abschirmendes Metallgehäuse zur Funktionsüberprüfung eingebaut.**

Die Hauptanforderung für die HF-Schaltergruppe wurde auf die erhöhte Kanalisolation gesetzt. Die erreichbare Isolation mit aktuellen integrierten Schaltkreisen und der benutzten HHI-Channel-Sounder Technologie genügt nicht den notwendigen Isolationsanforderungen. Daher wurde ein Konzept für eine zweistufige Schaltung aufgesetzt, ausgearbeitet und umgesetzt. Dieses Konzept beinhaltet die gleichzeitige angepasste Steuerung zweier Schalter-schaltkreise zur Erreichung der nötigen Dämpfung bzw. Umleitung der eingespeisten Hochfrequenzleistung. Somit wird im theoretischen Fall eine zweifache Isolation erzielt. Leider wird die elektromagnetische Leistung nicht nur über die Leitung sondern auch über Luft und Substrat gekoppelt, so dass zusätzliche Maßnahmen geplant wurden. Beispiele sind Aus-sparungen für Metallgehäuse, Trennwände für jede Stufe, Absorber-Material zur Umwandlung der abgestrahlten Wellen in Verlustleistung usw. Diese Maßnahmen wurden graduell implementiert, bis die erforderliche Isolation erreicht wurde. Die Module wurden auf Funktion getestet, notwendige Änderungen in der Schaltung wurden vorgenommen, damit der gewünschte Spannungspegel für den Schaltprozess erreicht wird. Anschließend wurden die Module in das System integriert und erfolgreich in Betrieb genommen.

Abbildung 64 zeigt die 2 erstellten (von 3 konstruierten) Modulen im Endzustand. Die Module sind im im HHI-Channel-Sounder integriert und alle Leitungen (elektrische Versorgung, Kontrollleitungen und HF-Leitungen) sind verbunden.



**Abbildung 64: 2 HF-Schaltergruppen, funktionsbereit im Gehäuse des HHI-Channel-Sounders eingebaut und integriert.**

Als Datengrundlage für die Entwicklung und die Verifikation von Antennenarray-Kalibrierverfahren wurden zunächst Kalibrationsmessungen mit dem HHI-Channel-Sounder und einem breitbandigen Antennenarray durchgeführt. Es wurden zwei aus der Literatur bekannte Kalibrierverfahren für die Anwendung im Ko-TAG Projekt herangezogen, die jedoch bezüglich ihrer Breitbandigkeit erweitert werden mussten. Bei den beiden betrachteten Kalibrierverfahren ergibt sich ein Abtausch bezüglich des Modellierungs- und Anwendungsaufwandes einerseits und der erzielbaren Genauigkeit andererseits. Es wurden in jedem der betrachteten Fälle die bestmöglichen Resultate ermittelt, so dass beim späteren Einsatz des Antennenarrays der geeignetere der beiden Algorithmen zur Verwendung ausgewählt werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchung der Algorithmen sind in eine Diplomarbeit (Schiller, 2012) eingeflossen. Weiterhin wurden verschiedene Varianten der Array-Signalmodellierung und der Array-Signalverarbeitung betrachtet, um die Genauigkeitsgrenzen auszuloten. Es wurden Verbesserungshinweise für nachfolgende Kalibriermessungen erarbeitet. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurden die erarbeiteten Kalibrieralgorithmen in ein Softwarepaket umgesetzt, mit dem es möglich ist nach erfolgter Kalibrierung mit einem breitbandigen Antennenarray, aus den Messdaten die Kalibrierdaten zu berechnen. Die berechneten Kalibrierergebnisse, die die Eigenschaften des Antennenarrays beschreiben, werden für die eigentliche Datenauswertung herangezogen.

Abschließend wurde im HHI-Channel-Sounder ein weiteres Datenaufzeichnungsmodul integriert, welches die gleichzeitige Aufzeichnung von vier (statt den bisherigen drei) parallelen Empfangszweige ermöglicht. Es wurden Belastungstests im Messbetrieb durchgeführt, sowie die Überprüfung der synchronen Aufzeichnung aller vier Datenaufzeichnungsmodule. Alle Tests wurden mit positivem Ergebnis bestanden.

#### 2.4.1.5.2 Dokumentation

Zunächst wurde anhand eines Laborversuchs verifiziert, dass eine Synchronisierung der Videodokumentation mit den Kanalmessdaten mittels einer Funkuhr realisierbar und ausreichend präzise ist. Daraufhin wurde ein Matlab-Skript erstellt, welches die Messzeiten aus den Kanalmessdaten ausliest und automatisch die entsprechenden Videoabschnitte ausschneidet.

Während einer Messung sind beide Fahrzeuge mit je einer Videokamera an der Frontscheibe und ein 360°-Videokamera auf dem Dach ausgestattet. Nach dem Einschalten der Videokameras werden die Funkuhren vor dem Objektiv gehalten, um eine spätere Synchronisierung zu ermöglichen. Somit wird von beiden Kameras die Zeit mit einer Genauigkeit von  $1/\text{Framerate}$  auf das Bild aufgenommen. Dieses Verfahren wird für jede Videodatei wiederholt (z.B. nach Wechsel der Batterien). Nach Abschluss der Messungen werden zunächst die 360°-Videos konvertiert und die in den Videos ablesbaren Uhrzeiten ermittelt und festgehalten. Daraufhin wird das Matlab-Skript angewendet, welches automatisch und präzise die entsprechenden Videoabschnitte ausschneidet und zur einfacheren Analyse des Messablaufs die vier Videos zu einem Multi-View-Video zusammengefügt. Dazu werden automatisch, die relevanten Daten aus den Messdateien extrahiert und in einer temporären Datenbank eingetragen. Diese Datenbank dient dann als Ausgangspunkt für die Extraktion der zugehörigen Filmabschnitte aus den ursprünglichen Videodateien. Der Prozess selbst wird auch gesondert in einer log-Datei zur Rückverfolgung von eventuellen Ungereimtheiten dokumentiert.

Das Verfahren der zeitlich synchronisierten Videodokumentation wurde erfolgreich umgesetzt. Insgesamt wurden über 200 Videos der Messkampagne 10 erstellt und die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft.

#### 2.4.1.6 Dynamische Schwellenanpassung

Ein wichtiger Faktor für eine robuste Funktion der Abstandsmessung, auch bei Verdeckung, ist die Art und Weise wie entschieden wird, ob ein gültiges TOF-Signal von der OBU am Transponder empfangen wurde. Hierzu wird das Empfangssignal abgetastet und zu jedem Zeitschritt bitweise mit dem erwarteten Signal verglichen. Stimmen die beiden binären Signale größtenteils überein, meldet der Detektor den Empfang eines gültigen Signals, und das TOF-Signal wird nach einer kurzen Wartezeit zurückgesendet. Wie viele Samples des 512 Samples langen TOF-Codes nun übereinstimmen müssen, kann durch die Wahl der Detektionsschwelle festgelegt werden. Sie entscheidet sowohl über die Empfindlichkeit, als auch über die Anzahl der Fehldetektionen und damit ungültigen Abstandsmessungen.

Besonders in Verdeckungsszenarien und bei großen Entfernungen wird das OBU-Signal deutlich geschwächt am Transponder ankommen. Wird aus diesem Grunde das Signal im Transponder nicht als solches erkannt, wird auch keine Antwort erfolgen und die Abstandsmessung wird in diesem Messzyklus fehlschlagen. Es ist nun naheliegend, eine möglichst niedrige Detektionsschwelle zu verwenden, um die Empfindlichkeit des Systems zu erhöhen. Eine zu niedrige Schwelle erhöht allerdings die Wahrscheinlichkeit, dass auf ein gar nicht vorhandenes OBU-Signal geantwortet wird, wodurch möglicherweise das tatsächliche Abstandssignal verpasst wird, und somit die Abstandsmessung wiederum fehlschlägt. Zudem wird durch ständige Fehldetektionen der Kanal unnötig mit falschen Transponderantworten belegt.

In theoretischen Berechnungen und praktischen Messungen konnte ermittelt werden, dass eine feste Wahl eines Schwellwertes sehr gute Ergebnisse liefert und eine dynamische Anpassung daher nur zu einer unnötigen Ressourcenbelegung der Digitalhardware führen würde. So wurde nachgewiesen, dass beispielsweise bei einer festen Schwelle von 340 eine Fehlalarmrate von unter  $10 \cdot 10^{-6}$  pro Sekunde erreicht wird und eine entsprechende festgesetzte Schwelle somit in der Praxis sehr gut geeignet ist.

### 2.4.1.7 Einheitliche Firmware-Update Funktionalität

Um den Einsatz der Geräte im Feld und bei den Projektpartnern flexibel zu gestalten, wurde ein Konzept über einen einheitlichen Firmware-Update Mechanismus erarbeitet und implementiert. Somit kann die Firmware jedes Gerätes (Kommunikationsplattform, TOF, AOA, HF), mit Ausnahme der Inertialsensorik, über eine einheitliche Schnittstelle des in der Kommunikationsplattform integrierten Webinterfaces aktualisiert werden. Dies macht den Gebrauch von Programmieradaptern, sowie das Öffnen der Geräte zur Aktualisierung überflüssig und erleichtert somit den Aktualisierungsablauf erheblich. In Kombination zum eigentlichen Firmware-Update ist ein Toolkit entstanden, mit dessen Hilfe spezifische Updates für die jeweiligen Module generiert werden können. Dies erleichtert dem Endbenutzer die Aktualisierung seiner Geräte erheblich, da dieser sich nicht um die Art des Updates kümmern. Abbildung 65 zeigt eine Abbildung der Firmware-Update Seite im Webinterface der Kommunikationsplattform.



Abbildung 65: Update Seite eines Ko-TAG Gerätes

### 2.4.1.8 Hardwarebeschleunigung bei DoA Berechnung

Die Implementierung MUSIC Algorithmus ist generell in 6 Unterblöcke gegliedert. In einem ersten Schritt wird die Kovarianz Matrix berechnet und diese Matrix dann Kalibriert. Um die Eigenwerte zu berechnen wird diese Matrix Tridiagonalisiert und mit einer QL-Zerlegung weiterverarbeitet. Mittels vergleich der Eigenvektoren des Rauschraums und dem Steeringvektor wird das inverse MUSIC Spektrum bestimmt. Mittels einer Minimum Suche werden dann die Möglichen Einfallswinkel bestimmt. Als letztes wird noch ein Qualitätswert für jeden Einfallswinkel berechnet.

Diese Teilalgorithmen können jeweils in einer Fixed- bzw. Floatingpoint Variante konfiguriert werden. Tabelle 4 vergleicht die gesamte Dauer einer Winkelberechnung an bei Verwendung verschiedener Datentypen.

Mode	FB	Covariance+Calib	Tridiagonalisation	QL decomposition	Time [us]
1D	On (5)	Fix	Fix	Fix	240
1D	On (5)	Float	Float	Double	1297
1D	On (5)	Float	Double	Double	1381
1D	Off	Fix	Fix	Fix	311
1D	Off	Float	Float	Double	1722
1D	Off	Float	Double	Double	1860
2D	-	Fix	Fix	Fix	447
2D	-	Float	Float	Double	2341
2D	-	Float	Double	Double	2521
True2D	-	Fix	Fix	Fix	656
True2D	-	Float	Float	Double	2134
True2D	-	Float	Double	Double	2275

**Tabelle 4: Gesamtperformance des MUSIC Algorithmus in Abhängigkeit vom Modus und Dateityp**

Tabelle 5 zeigt eine detailliertere Analyse der Performance der verschiedenen Teilberechnung Umsetzung und Bewertung der Gesamtarchitektur.

Algorithm setup (COV, TRI, QL)	Covariance matrix [us]	Tridiagonalisation [us]	QL decomposition [us]	Music [us]	Min search [us]	QoL [us]
FIX, FIX, FIX + FB	32	66	64	30	19	18
FIX, FIX, FIX	29	106	76	53	20	18
FLT, FLT, DBL + FB	585	93	533	30	19	18
FLT, DBL, DBL + FB	586	181	530	30	19	18
FLT, FLT, DBL + FB	583	152	883	53	20	18
FLT, DBL, DBL	583	294	878	53	20	18

**Tabelle 5: Performance der Teilschritte in Abhängigkeit vom Setup**

## 2.4.2 Umsetzung und Bewertung der Gesamtarchitektur

### 2.4.2.1 Breitbandige Winkelschätzung auf Kommunikationssignale

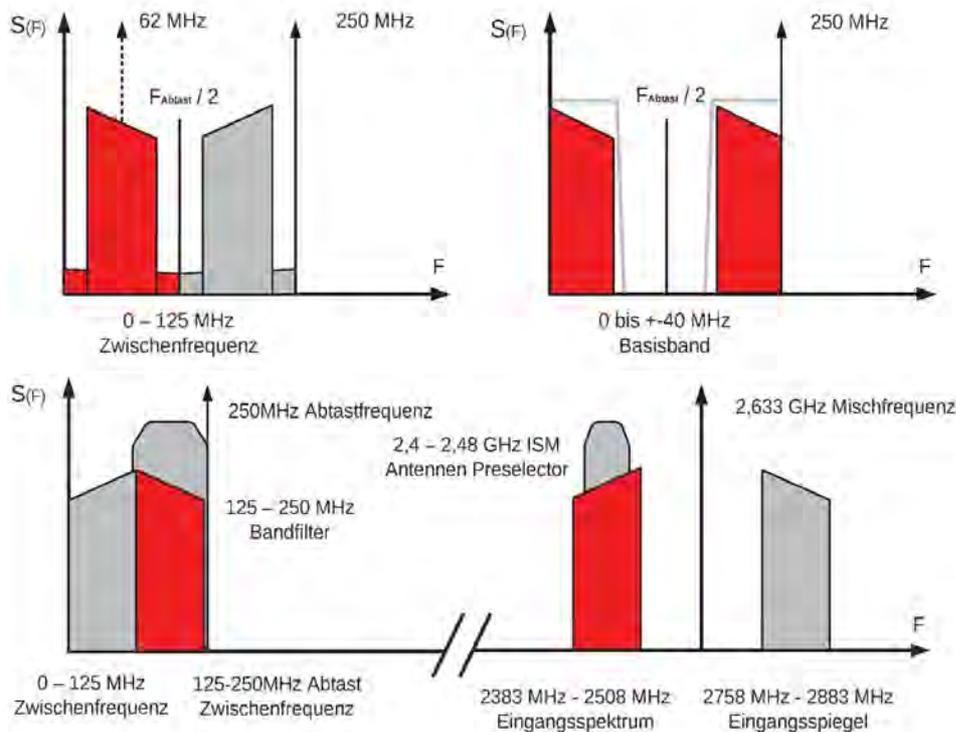
Zur Evaluierung eines Winkelschätzsystems mit hoher Bandbreite wurde ein Demonstrator entwickelt, mit dessen Hilfe Abtastwerte für jeden Empfangskanal eines Antennenarrays aufgezeichnet werden sollen. Diese Daten werden herangezogen um entsprechende Algorithmen zu testen und entsprechende Randparameter für einen Systementwurf zu finden.

#### 2.4.2.1.1 Aufbau Demonstrator

Zentrales Element des Demonstrators ist der Empfängerchipsatz LT9003-AA der Firma Linear Technology. Dieser Empfängerchipsatz beinhaltet Mischer, Bandpassfilter sowie Analogdigitalconverter. Dieser Chipsatz liefert am Ausgang digitale reellwertige Abtastwerte in der Zwischenfrequenz. Diese werden mit Hilfe eines 16901A Logikanalysators von Agilent aufgezeichnet und können exportiert werden. Die Daten werden anschließend in Matlab importiert und entsprechender Signalverarbeitung zugeführt.

Anhand des Aufbaus, der Abtastrate und der Mischfrequenz ergibt sich der Frequenzplan (siehe Abbildung 66). Der verwendete ADC arbeitet hierbei immer mit Unterabtastung. Um das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem nicht zu verletzen, werden interne Bandfilter(125MHz) verwendet. Um etwaige Spiegelfrequenzen am Eingang vor den Mixern zu unterdrücken, sind im Antennenarray Bandfilter vorgeschaltet, die Störer sowie Spiegelfrequenzen unterdrücken. Die vorselektierenden Bandfilter haben eine Bandbreite von 80MHz und unterdrücken somit Eingangsspiegel und beschränken analog die Systembandbreite. Flexibel ist nur die Mischfrequenz, welche das Eingangsband beeinflusst, sowie die Abtastrate was die Mittenfrequenz des abgetasteten Signals beeinflusst. Da jedoch der analoge, interne Bandpass nicht an eine Abtastratenänderung angepasst werden kann, besteht die Möglichkeit, dass sich hierbei Aliasfehler ergeben. Weshalb eine digitale Filterung und Abtastratenänderung mittels Verarbeitung in Matlab geschieht.

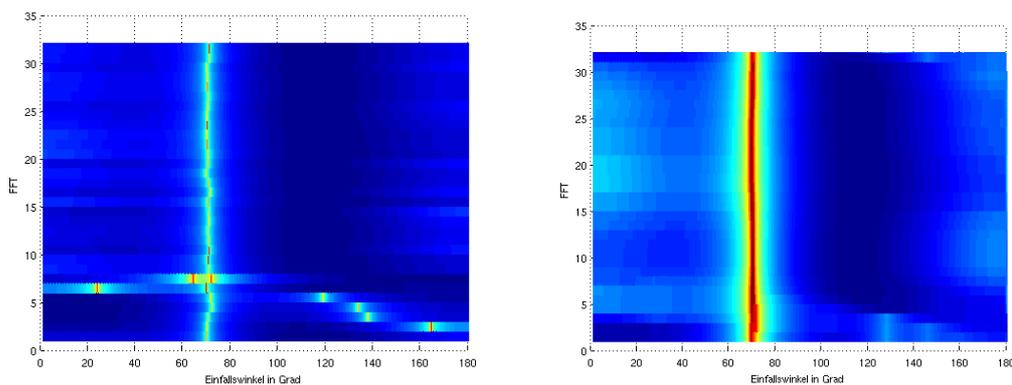
Beim Demonstrator wird ein Teil des 2,4GHz-ISM Bands mit einer Mittenfrequenz von 2445MHz genutzt. Durch die Mischfrequenz von 2,633GHz und einer Abtastrate von 250MHz, ergibt sich ein digitales Eingangssignal, welches auf einer Zwischenfrequenz von 62MHz liegt. Um dies in ein Basisbandsignal zu transformieren wird anschließend ein digitaler IQ-Demodulator in Matlab implementiert. Diese DDC Digital Down-Conversion mischt das Eingangssignal mit einer Sinus- bzw. Cosinusschwingung von 62 MHz und filtert anschließend mit einem Tiefpass der 41MHz 3dB-Eckfrequenz hat. Danach muss die Abtastrate auf die des Senders angepasst werden. Hierfür wurde eine Abtastratenänderung samt Filterung auf die jeweils entsprechende Rate vorgenommen. Die entsprechenden Filter entsprechen einem FIR Finite Impulse Response - Filter mit endlicher Impulsantwort-Entwurf nach Tchebychev-Typ2.



**Abbildung 66: Frequenzplan Demonstrator**

#### 2.4.2.1.2 Ergebnisse

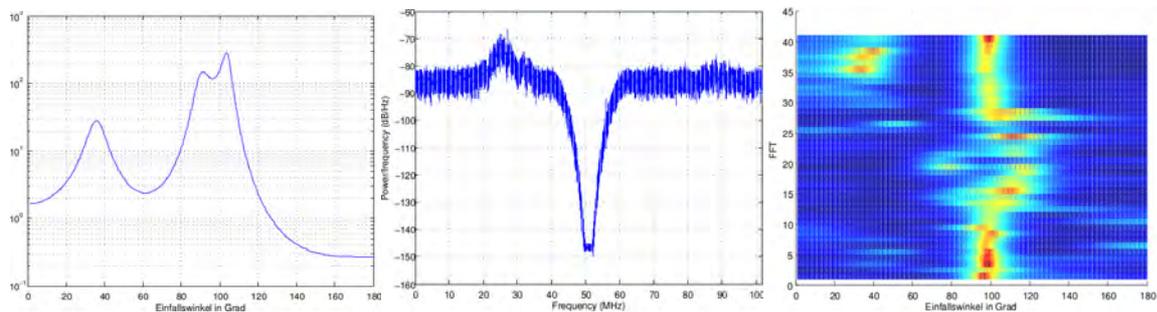
Mit Hilfe des Demonstrators können breitbandige Signale an Gruppenantennen analysiert werden. Als Teil dieser Analyse kann mittels MUSIC die Räumliche Kovarianz des Eingangssignals analysiert werden. Dies ermöglicht eine Bewertung des Empfangssignals in Abhängigkeit von Einfallswinkel und Frequenz. Des Weiteren können breitbandige Signale als ganzes analysiert werden. Abbildung 67 zeigt ein solches Spektrum bei dem der Winkel über die Frequenz dargestellt ist. Hierbei wurde ein OFDM-moduliertes, 80MHz breites und 15us langes Signal genutzt, welches im 2,4GHz ISM-Band gesendet wird. Mit Hilfe von 2D-Filtern können hierbei schmalbandig auftretende Störungen im Winkelspektrum unterdrückt werden, wie anhand der 2D-Median gefilterten Ergebnisse zu erkennen ist.



**Abbildung 67: MUSIC Spektrum: links ungefiltert, rechts 2D Median gefiltert**

Anhand der Einfallsspektren kann ferner eine Klassifikation von Störquellen erfolgen. Abbildung 68 zeigt den Einfluss eines WLAN-Accesspoints auf die oben genannten Sendesequenzen bei zeitlicher Überlagerung. Die Sendesequenz wurde hier mit zwei Sendeantennen bei 90 und 110 Grad Einfallswinkel eingestrahlt, was einem kohärenten Mehrweg entspricht. Bei Auswertung eines breitbandigen Summensignals ergäbe sich keine Trennbarkeit der

Sendequellen von der zusätzlichen Störquelle, da sich dieser erst aus dem Bezug von Winkel und Nutzfrequenz im räumlichen MUSIC-Spektrum zeigt.



**Abbildung 68:** links MUSIC-Spektrum von Empfangssignal, mitte Spektrum des Empfangssignals, rechts räumliches MUSIC-Spektrum von 2 überlagerten Stör-Signalen

#### 2.4.2.2 Informationübertragung in ToF-Beacons

Um die gemeinsame Nutzung eines begrenzten spektralen Bereichs zur selben Zeit zu ermöglichen bietet es sich prinzipiell an, den Bandbereich für die Kommunikationsdaten und die Abstandsmessung aufzuteilen. Dies ist möglich durch Aufteilung des zur Verfügung stehenden spektralen Bereichs, ähnlich einem Frequency Division Multiple Access (FDMA) Prinzips. Hierbei wird im vorliegenden Fall jedoch das Spektrum nicht auf verschiedene Nutzer geteilt wie beim klassischen FDMA, sondern für das Projekt KoTAG war die Idee, ein ähnliches Verfahren für eine Aufteilung auf die 2 verschiedenen Signalströme anzuwenden, welche von einem einzelnen Sender ausgesendet werden. Der gewählte Ansatz beruht hierbei auf der Störungsvermeidung durch Orthogonale Träger und Frequenzmultiplex.

Zusätzlich zur theoretischen Beschreibung des entwickelten neuen Verfahrens wurden auch Simulationen durchgeführt, mit denen diese Methode genauer untersucht wurde.

#### 2.4.2.3 Funkkanalmessungen für Ko-TAG-relevante Szenarien

Es wurden drei Messaktivitäten geplant, durchgeführt und ausgewertet. Diese Aktivitäten waren Testkörperuntersuchungen, Antennenmessungen (Antennenarray und Einzelantennencharakteristik) und begleitende Messungen zu der gemeinsamen Messkampagne der Verbundprojekte Ko-TAG und Ko-PER in Aschaffenburg.

##### 2.4.2.3.1 Testkörperuntersuchungen

Im Zusammenhang mit den Arbeiten zur Inbetriebnahme der KoTAG-Systemkomponenten ist im Konsortium der Bedarf an standardisierten Testprozeduren entstanden. Diese Testprozeduren sollten sich an unterschiedlichen Standorten realisieren lassen und reproduzierbare Testergebnisse liefern können. Eine besondere Herausforderung stellten in diesem Zusammenhang Tests dar, bei denen die Sichtverbindung zwischen SafeTAGs und OBUs verdeckt ist. Es wurde eine technische Möglichkeit in Form geeigneter Verdeckungskörper (Testkörper) identifiziert und definiert, die die Sichtverdeckung durch Personen realitätsnah und reproduzierbar nachbildet. Dabei wurden zwei Alternativen in Betracht gezogen: ein einfacher, mit Wasser gefüllter Behälter und handelsübliches Absorbermaterial für elektromagnetische Wellen.

Zunächst bestand die Arbeitshypothese, dass Testkörper auf der Basis von Salzlösungen für den beschriebenen Zweck geeignet sind. Das Ziel der ersten Untersuchungen bestand darin, die geeignete Zusammensetzung einer Salzlösung zur Verwendung in einem Testkörper zu ermitteln. Der Testkörper sollte durch die Salzlösung bezüglich der Transmission und Ab-

sorption von Radiowellen im relevanten Frequenzbereich um 5.9 GHz ähnliche Eigenschaften erhalten, wie sie menschliches Gewebe aufweist. Es wurde von Anfang an nicht nur die Reduktion der Transmission (Transmissionsdämpfung) betrachtet, die den eigentlichen Verdeckungseffekt verursacht, sondern auch die Reflexion. Erste Voruntersuchungen hatten gezeigt, dass wassergefüllte Behälter zwar den gewünschten Abschattungseffekt aufweisen, jedoch deutlich stärker reflektieren als menschliche Körper. Dies kann bei der Durchführung von Tests mit KoTAG Systemkomponenten zusätzliche Mehrwegekomponenten erzeugen. Dieser Effekt kann zu Verfälschungen der Testergebnisse führen und wäre außerdem im Rahmen solcher Tests praktisch nicht reproduzierbar und analysierbar.

In der Laborumgebung werden durch mannigfaltige Reflexionen an Wänden und Laborausstattungen viele Mehrwegekomponenten erwartet. Bei der Messauswertung konnten die durch Testkörper zusätzlich entstehenden Mehrwegekomponenten identifiziert und deren Häufigkeit und Intensität analysiert werden.

Es wurden alle drei Fälle

- Unverdeckt, Sichtlinie zwischen Tx-Antennen und Rx1
- Verdeckung der Sichtlinie mit Wasser gefülltem Behälter
- Verdeckung der Sichtlinie durch eine Person

vermessen.

Nach der Auswertung dieser Messungen konnte eine klare Empfehlung für die Realisierung eines geeigneten Testkörpers auf der Basis von elektromagnetischem Absorbermaterial abgegeben werden. Zur Verifikation dieser Empfehlungen wurde im März 2013 eine weitere Messung im HHI-Labor durchgeführt.

Die Ergebnisse des Auswerteverfahrens zeigen deutlich, dass sich ein Wasserbehälter tendenziell eher wie eine reflektierende Metallplatte verhält als wie ein absorbierendes Objekt. Die Auswertung der Negativproben zeigte weiterhin, dass die Messungen in Verbindung mit dem Auswertungsverfahren als reproduzierbar und zuverlässig interpretiert werden können. Daher kann auf dieser Grundlage eine klare Empfehlung für die Definition eines Testkörpers für Ko-TAG Verdeckungsmessungen unter Verwendung von elektromagnetischen Absorberelementen in Pyramidenform gegeben werden.

Ein geeignetes Absorberelement ist das Modell EPP-22, das von Fa. Telemeter ([www.telemeter.info](http://www.telemeter.info)) angeboten wird. Das Absorberelement hat eine Grundfläche von 500mm x 500mm und eine Höhe von 200mm.

Die Absorberelemente wurden zum mechanischen Schutz und zum besseren Handling in einen Karton aus Wellpappe entsprechender Größe eingesetzt. Ein geeignet erscheinendes Modell für einen Karton der Fa. Rajapack GmbH ist Artikel Nr. CAD21B Die Innenabmessungen des Kartons betragen 500mm x 500mm x 300mm.

Ein Absorberelement sollte also exakt auf den Boden des Kartons passen. Die ebene Grundfläche des Absorbers kann man ggf. mit doppelseitigem Klebeband am Boden des Kartons befestigen und so gegen verrutschen sichern. Um das Ganze bei Bedarf wetterfest zu bekommen, kann man den Karton mit einer PE-Folie umhüllen.

Weitere leere Kartons könnte man ebenfalls für die Testaufbauten nutzen, um definierte Positionen von SafeTAG und Absorber zu realisieren.

#### 2.4.2.3.2 Antennenmessungen

In Zusammenhang mit den Arbeiten zur Antennenarray-Kalibrierungsverfahren wurden Verifizierungsmessungen und neue Messungen zur Prüfung des Kalibrierberechnungsverfahrens durchgeführt. Für diese Messungen mussten die abweichenden Bedingungen bzgl. Dauer, Stabilität der Konstruktion, reproduzierbaren Messablaufs und Freiraumbedingungen am Messort berücksichtigt werden.

Als Vorbereitung für die Antennenarray-Messungen wurde die entwickelte Antennenpositioniervorrichtung noch einmal überprüft, ob die Einfallswinkel der Funkwellen bzgl. des Antennenarrays auf der Azimut-Ebene im Bereich von  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$  abtastet werden können. Mit einer weiteren Befestigung und einem Stativ variabler Höhe wurde eine Hornantenne in einem Abstand von 5 m angebracht. Im Rahmen der Antennenarray-Messungen wurden auch Messungen zur Antennencharakteristik durchgeführt, die sich problemlos in den Messablauf integrieren ließen.

Bei Messungen zum Antennenarray-Kalibrierungsverfahren wurde das lineare Antennenarray, bestehend aus acht Antennenelementen, von denen die beiden äußeren mit einem Wellenwiderstand abgeschlossen waren, mit einer Auflösung im Azimut-Winkel von  $3^\circ$  im Bereich von  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$ , vier Elevationswinkel ( $-2.5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  und  $10^\circ$ ) für die Verifikationsmessungen mit kopolarisierten Antennenausrichtungen vermessen. Für die neuen Messungen wurde alle acht Antennenelementen des Antennenarrays verwendet. Es wurden dabei fünf Elevationswinkel ( $-4^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $11^\circ$  und  $15^\circ$ ) vermessen.

Die Messungen zur Bestimmung der Antennencharakteristik wurden in derselben Messkampagne durchgeführt. Hierzu wurden drei Einzelantennen jeweils in Azimut- (Bereich  $-180$  bis  $180^\circ$  in  $3^\circ$  Schritten) und Elevationswinkel (Bereich  $-90$  bis  $90^\circ$  in  $3^\circ$  Schritten) vermessen.

Die Messdaten für das Antennenarray wurden benutzt um die Ergebnisse des Kalibrierungsverfahrens zu verifizieren und zu validieren. Des Weiteren wurde die Langzeitstabilität und die Gültigkeitsdauer der Kalibrierungsdaten überprüft. Insbesondere wurde geprüft ob eine Kalibrierung unbedingt unmittelbar vor der Messung notwendig ist, oder ob die Kalibrierung auch im Vorfeld der Messung stattfinden kann.

Abbildung 69 zeigt den optimierten Aufbau zur o.g. Verifikation. Die vorgeschlagenen Absorber-Elemente aus 2.4.2.3.1 sind die vier gestapelten Kartonkisten, während weiteres Absorber-Material liegt auf dem Boden zur Dämpfung der Bodenkomponente. Das Antennenarray wird mit Hilfe eines 1-Achsenpositionierers auf den gewünschten Winkel eingestellt. Die Vorrichtung steht auf (weiße) Styropor Quader, welches in der betrachteten Frequenz als transparent angenommen werden kann.



**Abbildung 69: Optimierter Aufbau zur Verifikation der ausgewählten Kalibrationsverfahrens.**

Die Messdaten für die Antennencharakteristik wurden erfolgreich ausgewertet und die Charakteristik der vermessenen Antennen wurde verglichen um eventuelle Abweichungen bei

den Exemplaren zu identifizieren. Daraus wurde auf die ähnlichen Eigenschaften der Antennen geschlossen.

#### 2.4.2.3.3 Messkampagne Ko-TAG/Ko-PER

Für die Messkampagne Ko-TAG/Ko-PER in Alzenau, Berlin und Aschaffenburg wurden die in Ko-KOMP erarbeiteten Vorbereitungsroutrine durchgeführt und die geplanten Messdurchläufe mit den Projektpartnern abgestimmt. Die detaillierte Planung der Messkampagne erfolgte durch die entsprechend Verantwortlichen in den Projekten Ko-TAG und Ko-PER und wurde über ZENTEC an das HHI weitergereicht.

Die Messungen wurden planmäßig und erfolgreich durchgeführt. Dazu zählten Messungen mit Fußgängerüberquerung in der Flachstr. (Aschaffenburg), sowie Messungen zur Eigenlokalisierung mit einer stationären Antenne an der Ko-PER-Kreuzung. Bei jeder Messung wurden dabei unterschiedliche Antennenpositionen und –polarisationen verwendet, um einen direkten Vergleich zwischen unterschiedlichen Bedingungen zu ziehen. Dies wurde in der Auswertung entsprechend aufgegriffen.

Die Messdaten wurden entsprechend der offenen Fragen der Projektpartner ausgewertet und die Ergebnisse dokumentiert. Damit konnten Aussagen gemacht werden zu den offenen Fragen: maximale Entfernung für Hauptpfaddetektion, Einschränkung durch Ausgabe von lediglich 3 Pfaden, signifikante Unterschiede zwischen Polarisationskombinationen. Zudem wurden Aussagen bzgl. unterschiedlicher Antennenhöhen, sowie Leistungsabstand zwischen direktem Pfad und Mehrwegpfade getroffen. Zudem wurde für jede durchgeführte Messung ein automatisch zeitlich synchronisiertes Multi-View-Video erstellt um die Bedingungen während der Messung rekonstruieren zu können.

Nachfolgend einer Übersicht der für Ko-TAG und Ko-PER durchgeführten Messungen.

<b>Zeit</b>	<b>Ort</b>	<b>Szenario</b>	<b>Messungen</b>
Juli 2011	Alzenau	Ko-TAG Szenarien	84
Juli 2011	Aschaffenburg	Ko-PER Szenarien	9
Dezember 2011	Berlin	Ko-TAG Szenarien	15
Mai 2012	Berlin	Ko-TAG Szenarien	12
Juli 2012	Alzenau	Ko-TAG Szenarien	25
März 2013	Aschaffenburg	Ko-PER Szenarien	49
März 2013	Aschaffenburg	Ko-TAG Szenarien	16

#### 2.4.2.3.4 *Arbeitsplan zur Integration von Ko-TAG Funkkanalmodellen in OPNET*

##### 2.4.2.3.4.1 *HHI Car2X Channel Model*

Die Modellierung des Ko-TAG Funkkanals orientiert sich stark an der am HHI entwickelten Kanalmodellierung für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation CCM (Car2X Channel Model). Dabei ist der prinzipielle Ansatz eine breitbandige Modellierung und Simulation des Funkkanals mit einer anschließenden Bandbegrenzung auf die Kommunikationsbandbreite. Die Modellierung erfolgt im Zeitbereich und baut auf Verteilungsdichtefunktionen relevanter Kanalparameter auf. Dabei wird zunächst entsprechend des Szenarios, also abhängig von Umgebung und Bewegungskonstellation, das entsprechende Parameterset ausgewählt. Da-

raufhin werden in Abhängigkeit der Distanz entsprechende Verteilungsdichtefunktionen gewählt und schließlich mithilfe eines Zufallsgenerators die notwendigen Kanalparameter bestimmt. Diese werden dann verwendet um sukzessiv die zeitvariante Kanalimpulsantwort aufzubauen.

#### 2.4.2.3.4.2 *OPNET Modell*

Die Modellierung der Funkkommunikation folgt im OPNET-Simulator einem 13-stufigen System, wie in Abbildung 70 dargestellt. Für jede Stufe gibt es ein Default Model mit voreingestellten Eigenschaften. Zudem besteht die Möglichkeit einzelne Stufen, die für die eigene Simulation nicht relevant sind, als eine „None Pipeline Stage“ zu deklarieren. Für diesen Fall hat die entsprechende Stufe keinen Einfluss auf die Simulation.

Nachfolgend werden die einzelnen Stufen zusammenfassend beschrieben, Vergleiche zum CCM gezogen und, soweit möglich, Vorschläge für die Parametrierung des OPNET-Modells bzw. Zusammenführung mit den Ko-TAG-Funkkanalmodellen formuliert.

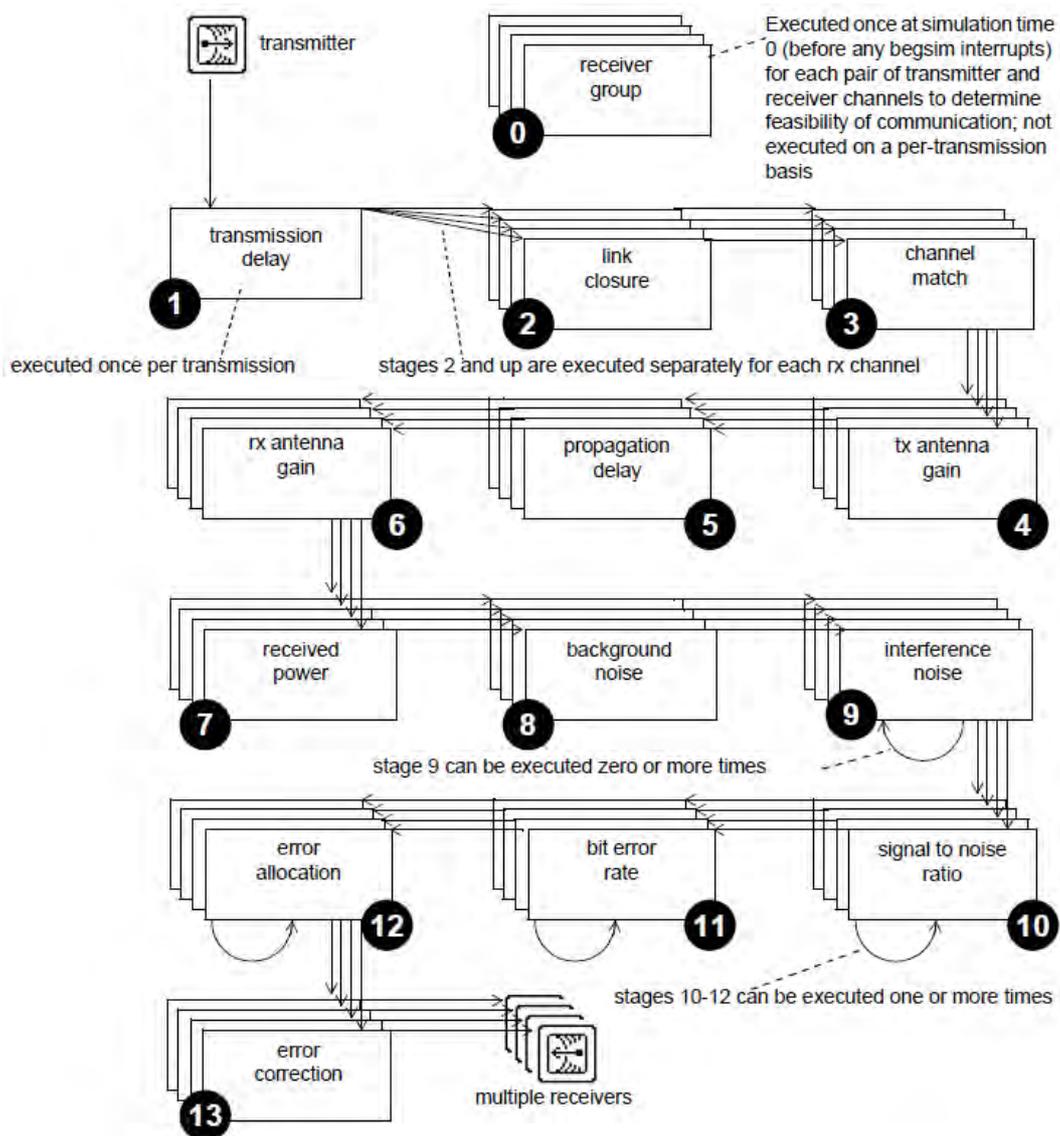
##### 0. RECEIVER GROUP

Diese Stufe dient der Bestimmung der potentiellen Empfängergruppe einer Nachricht und damit der Reduktion der Simulationszeit.

→ Keine Relevanz in Bezug auf CCM.

##### 1. TRANSMISSION DELAY

Diese Stufe gibt die Dauer eines gesendeten Pakets an. → Für die Übertragung mit einem IEEE 802.11p mit 10MHz Bandbreite ergeben sich Paketdauer in Abhängigkeit der Datenmengen, wie in Abbildung 71 dargestellt.



**Abbildung 70: Struktur der OPNET Simulation**  
 (Quelle: OPNET Wireless Module User Guide for Modeler)

## 2. CLOSURE

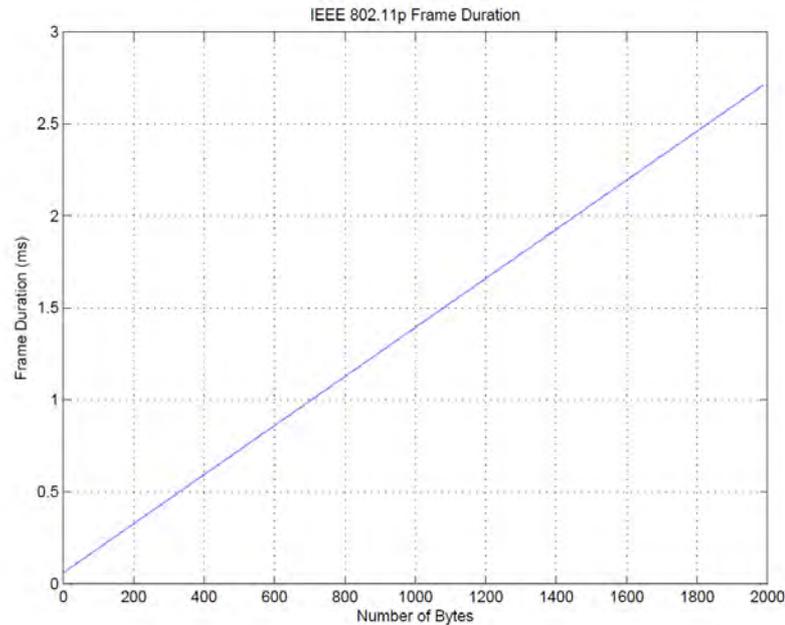
Diese Stufe gibt an, ob eine Verbindung zwischen Sender und Empfänger physikalisch möglich ist. Dies umfasst gewollte Signale, wie auch interferierende Signale. → Dazu können bisher keine verlässlichen Angaben für Ko-TAG Szenarien gemacht werden. Erfahrungen aus Messdatenanalysen zeigen jedoch, dass mindestens alle Signale, die in einem Umkreis von 100m gesendet werden, berücksichtigt werden sollten, auch bei Verdeckung der Antennen.

## 3. CHANNEL MATCH

Hier wird unterschieden, ob das Paket: 1. gültig ist, 2. als Interferenz interpretiert wird, 3. nicht gültig ist und somit ignoriert wird. → Hier würde die eigentliche Kanalmodellierung eingreifen und über den Kanalgewinn die empfangene Leistung bestimmen. In Verbindung mit entsprechenden Schwellwerten, z.B. -94 dBm und -82 dBm, könnte somit zwischen den drei oben genannten Fällen unterschieden werden.

## 4. TRANSMITTER ANTENNA GAIN

Diese Stufe gibt den Sender-Antennengewinn inklusive Richtcharakteristik an. → Eine geeignete Parametrierung sollte durch Ko-TAG Projektpartner erfolgen, die mit dem Frontend- und Antennendesign betraut sind.



**Abbildung 71: Dauer eines gesendeten IEEE 802.11p Pakets**

#### 5. PROPAGATION DELAY

Diese Stufe gibt die Verzögerungszeit des Signals von Sender zu Empfänger an. → Für Ko-TAG Szenarien ist dies zu vernachlässigen. Bei einem Abstand von 100m beträgt die Verzögerungszeit etwa  $0,3\mu\text{s}$ , also bei einem Paketvolumen von 200 Bytes (entspricht ca.  $300\mu\text{s}$  Paketdauer, siehe oben) nur 0,1% der Paketdauer.

#### 6. RECEIVER ANTENNA GAIN

Diese Stufe gibt den Empfänger-Antennengewinn inklusive Richtcharakteristik an. → Eine geeignete Parametrierung sollte durch Ko-TAG Projektpartner erfolgen, die mit dem Frontend- und Antennendesign betraut sind.

#### 7. RECEIVED POWER

Hier wird die Leistung des empfangenen Signals bestimmt. → Ähnlich wie in CHANNEL MATCH ist es Aufgabe der Kanalmodellierung zu bestimmen, wie viel Leistung empfangen wird, basierend auf Eingangswerten wie z.B. Szenario, Sendeleistung und Abstand zwischen den Antennen.

#### 8. BACKGROUND NOISE

Diese Stufe bezieht das vorhandene Hintergrundrauschen mit ein. → Für am HHI durchgeführte Übertragungssimulationen wurde ein Wert von -94 dBm gewählt. Dieser setzt sich zusammen aus -104 dBm thermisches Rauschen für eine Bandbreite von 10MHz sowie einer Rauschzahl von 10 dB der empfangsseitigen Signalverarbeitungskette. Diese Werte können durch Ko-TAG Projektpartner präzisiert werden, die mit dem Frontenddesign betraut sind.

#### 9. INTERFERENCE NOISE

In dieser Stufe wird die gegenseitige Interferenz gleichzeitig ankommender Signale modelliert. → Ankommende Signale sollten in Abhängigkeit der empfangenen Leistung bewertet und die Interferenz entsprechend modelliert werden. Nach einer tieferen Auseinandersetzung mit OPNET sollten Einzelheiten dazu erarbeitet werden.

#### 10. SIGNAL-TO-NOISE RATIO

Diese Stufe bestimmt den SNR-Wert für ein ankommendes Paket. → Dieser Wert setzt sich aus Sendeleistung, den Antennengewinnen, dem Kanalgewinn und dem Rauschen zusammen. Aktuell ist für diese Stufe keine direkte Verwendung absehbar.

#### 11. BIT ERROR RATE

Diese Stufe bestimmt die Bitfehlerrate, üblicherweise in Abhängigkeit des SNR. → Um diese Stufe auf ein Ko-TAG-relevantes Verhalten zu bringen, müsste ein entsprechendes Funksystem-Kanalmodell entwickelt werden. Diesbezügliche Vorarbeiten wurden im HHI im Rahmen des Projektes Ko-KOMP durchgeführt und könnten hier einfließen.

#### 12. ERROR ALLOCATION

Diese Stufe bestimmt die Stellen der aufgetretenen Bitfehler. → Kein Handlungsbedarf.

#### 13. ERROR CORRECTION

Diese Stufe bestimmt ob das Paket an die benachbarten Schichten des Knoten weitergeleitet wird. → Kein Handlungsbedarf.

Folgende Stufen der OPNET Simulation müssten für eine Integration der Kanalmodelle nicht angepasst werden: 0, 5, 10, 12, 13. Weiterer Präzisierungsbedarf für notwendige Anpassungen besteht bei den Stufen: 4, 6, 8, 9, 11.

#### 2.4.2.4 Änderungen für Car2Car Kompatibilität

Aufgrund des unterschiedlichen Systemtakts von 125 MHz am SafeTAG 2.0 System gegenüber 120 MHz für die 802.11p-konforme Datenkommunikation kann das SafeTAG 2.0-System nicht ohne weiteres mit anderen Car-2-Car-Einheiten kommunizieren.

Allerdings sind nur geringe Änderungen in der Software nötig, um das System an die Standard-konforme C2C-Kommunikation anzupassen. Nach Anpassung des Systemtakts durch eine Anpassung der Clockmodul-Firmware und einiger kleinerer Änderungen innerhalb der OFDM-Basisbandsignalverarbeitung durch den Projektpartner HHI konnte eine Interoperabilität des SafeTAG 2.0 Systems mit Car-to-Car-Kommunikationseinheiten aus dem Projekt SimTD nachgewiesen und der korrekte Empfang von C2C-Datenpaketen von KoPER-Fahrzeugen auch auf der Abschlussdemonstration im September 2013 in Aschaffenburg demonstriert werden.

Dies ist für zukünftige Anwendungen sehr vorteilhaft, da damit die Integration der Ortungstechnologie in das bestehende Car2Car-Umfeld weiter vereinfacht wird.

#### 2.4.2.5 Diversitykonzept für Gesamtarchitektur

SafeTAG 2.0 besitzt im Gegensatz zu SafeTAG 1.0 bereits einen integrierten Diversity-Schalter, welcher die beiden Antennenanschlüsse zur Distanzmessung und Kommunikation abwechselnd verwenden kann. Damit konnten innerhalb des Projekts auch Tests zur Antennendiversity gegen Fading-Einflüsse durchgeführt werden. Die SafeTAG 1.0-Systeme wurden im Lauf des Projekts nachträglich mit Antennenumschaltern ausgerüstet, um auch damit die Diversity-Funktionalität einsetzen zu können.



Abbildung 72: SafeTAG 2.0 Transponder mit 2 Antennen für Diversity-Betrieb

## 2.5 Standardisierung

### 2.5.1 Analyse und Bewertung bestehender Systeme

#### 2.5.1.1 Untersuchung verfügbarer Chipsets zur Anwendung für Ortung

Parallel zu den Eigenentwicklungen des Ko-TAG Systems fanden Untersuchungen und Rechen statt, mit dem Ziel fertig produzierte oder derzeit entwickelte Transceiver Chips zu finden, die sich für das Ko-TAG System eignen. Dabei lag das Suchkriterium auf IEEE802.11p kompatiblen Kommunikationschips, die zusätzlich für Ko-TAG verwendbare Lokalisierungsfunktionen beinhalten.

Im Ergebnis musste festgestellt werden, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Produktentwicklung identifiziert werden konnte, die die Anforderungen des Ko-TAG Systems erfüllt. Die Hersteller von 802.11p-kompatiblen Transceivern scheinen sich bislang komplett auf die Kommunikationsfunktionalität zu konzentrieren, während sich die Hersteller von Lokalisierungslösungen bislang entweder auf Ultra-Wide-Band-(UWB)-Ansätze oder auf das 2.4 GHz-Band zurückgreifen, das auf Grund der physikalischen Eigenschaften bessere Ausbreitungscharakteristiken verspricht. Hier müssen weiterhin Gespräche geführt werden, um zum einen aktuelle Produktentwicklungen nicht zu verpassen, und um zum anderen die Hersteller von der Attraktivität einer zusätzlichen Produktentwicklung zu überzeugen, die ihnen hilft, ihr Kommunikationsprodukt mit Zusatzfunktionalität so zu erweitern, dass ein Differenzierungsmerkmal gegenüber den konkurrierenden Produkten zu erzielen ist.

#### 2.5.1.2 Störfestigkeit und Kompatibilität bzw. Koexistenz

##### 2.5.1.2.1 Aufbau einer Emulationsumgebung für Stör- und Koexistenztests

Mit der Fertigstellung der Hardware konnten zum einen Realtests erfolgen und zum anderen war es möglich, mit der fertigen Zielhardware den nächsten Schritt im Entwicklungsprozess, die Integration in einen Emulator-Aufbau zu tätigen. Ziel des Emulators ist es zum einen eine definierte Umgebung zu schaffen, um z.B. gezielt das Systemverhalten zu verändern oder Fehlverhalten provozieren zu können. Zum anderen wird auf diese Art und Weise auch eine stabile Umgebung geschaffen, mit deren Hilfe Test gefahren und auch reproduziert werden können.

##### 2.5.1.2.1.1 Aufbau des Emulators

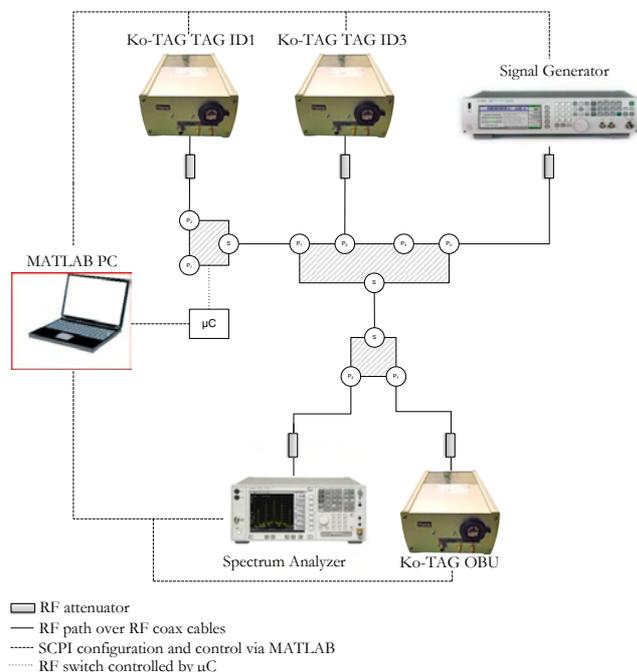
Wie im Beispielaufbau in Abbildung 73 gezeigt werden mehrere Ko-TAG Knoten mit Hilfe von HF-Kabeln und HF-Switches miteinander verbunden. Zusätzlich werden diese Knoten und alle anderen HF-relevanten Teile in speziellen Schirmboxen verbaut, so dass diese sich gegenseitig nicht passiv beeinflussen können. Zwischen die einzelnen Pfade werden zusätz-

lich variable Dämpfungsglieder und HF-Splitter verbaut. Dies ermöglicht es einzelne Pfadeigenschaften gezielt zu verändern.

Weitere wichtige Komponenten im Emulator-Aufbau stellen die Messgeräte dar. Ein Signal-Generator wird dazu verwendet, um gezielt Störeinflüsse wie ein Dauerrauschen oder auch zeitlich gesteuerte Signale auf dem Kanal zu produzieren. Auf diese Weise kann das Systemverhalten z.B. gegenüber koexistierenden Systemen geprüft und gegeben falls verbessert werden.

Zusätzlich wird ein Network-Analyzer mit verbaut. Dieser kann einerseits dazu verwendet werden, um bestimmte Kanalzustände aufzuzeichnen und zu untersuchen, andererseits kann das gerät auch als zusätzlicher Trigger-Geber fungieren, um z.B. bestimmte Aktionen, abhängig vom Kanalzustand auszulösen.

Eine letzte wichtige Komponente stellt die Emulator-Steuerung dar, die aber separat in Kapitel 2.5.1.2.1.2 näher erläutert wird.



**Abbildung 73: Beispielhafter Aufbau des Ko-TAG Emulators**

#### 2.5.1.2.1.2 Emulator-Steuerung

Die Emulator-Steuerung ist eine wichtige Komponente im gesamten Emulator-Aufbau. Repräsentiert wird sie durch eine Kombination eines PC/Notebooks mit MATLAB Installation und einer Mikrocontroller-Plattform.

Alle Geräte innerhalb des Emulators lassen sich mit Hilfe des Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) Protokoll ansteuern. Dieses Protokoll wird hier dazu verwendet, die Messgeräte und die HF-Pfade zu konfigurieren. Dazu sind alle HF-relevanten Bauteile, wie die variablen Dämpfungsglieder mit der Mikrocontroller-Plattform verbunden, die die SCPI Kommandos entgegen nimmt und den Emulator entsprechend konfiguriert.

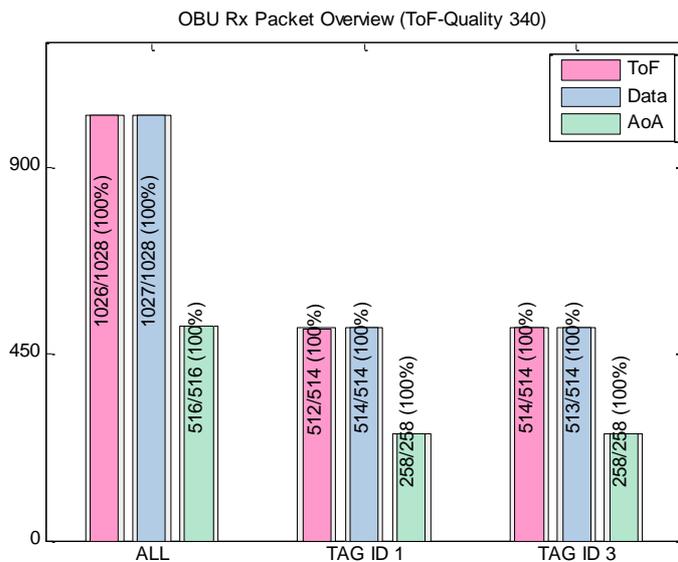
Die Ko-TAG Geräte, die in dem Emulator verbaut sind werden mit einer speziellen Firmware ausgestattet, die ebenfalls in der Lage ist, SCPI Kommandos zu interpretieren und entsprechende Aktionen auszuführen.

#### 2.5.1.2.1.3 Interpretation der Emulations-Ergebnisse

Tabelle 6 und Abbildung 74 zeigen das Resultat eines beispielhaften Emulator-Durchlaufs. In diesem Durchlauf steht ein freier exklusiver Kanal ohne Störungen zur Verfügung. Die Pfade zwischen den einzelnen SafeTAGs und der OBU unterscheiden sich hier. Der Pfad zwischen OBU und dem SafeTAG mit der TAG-ID 1 ist hier stärker gedämpft und somit generell anfälliger gegenüber Störungen. Anhand von Tabelle 6 lässt sich erkennen, dass für alle drei Paket-Typen eine Paketerfolgsrate von 100% (bei insgesamt 2572 Paketen) erreicht wird. Des Weiteren zeigt Abbildung 75 das Verhalten der Abstandsmessungen mit dem Zeitstempel der Messung auf der X-Achse, der gemessenen Distanz auf der Z-Achse und der entsprechenden Qualität auf der Y-Achse. Die dichten Wolken auf den fix bleibenden Distanzwerten und die hohe Qualität über einem Schwellwert von 340 deuten auf ein sehr gutes Messergebnis hin.

<b>1<sup>st</sup> Run PSR</b>			
	<i>TOF</i>	<i>AOA</i>	<i>Data</i>
<i>ALL</i>	100%	100%	100%
<i>ID1</i>	100%	100%	100%
<i>ID3</i>	100%	100%	100%

**Tabelle 6: Paketerfolgsraten der unterschiedlichen Emulationsdurchläufe**



**Abbildung 74: Paketerfolgsraten in einem ungestörten Kanal**

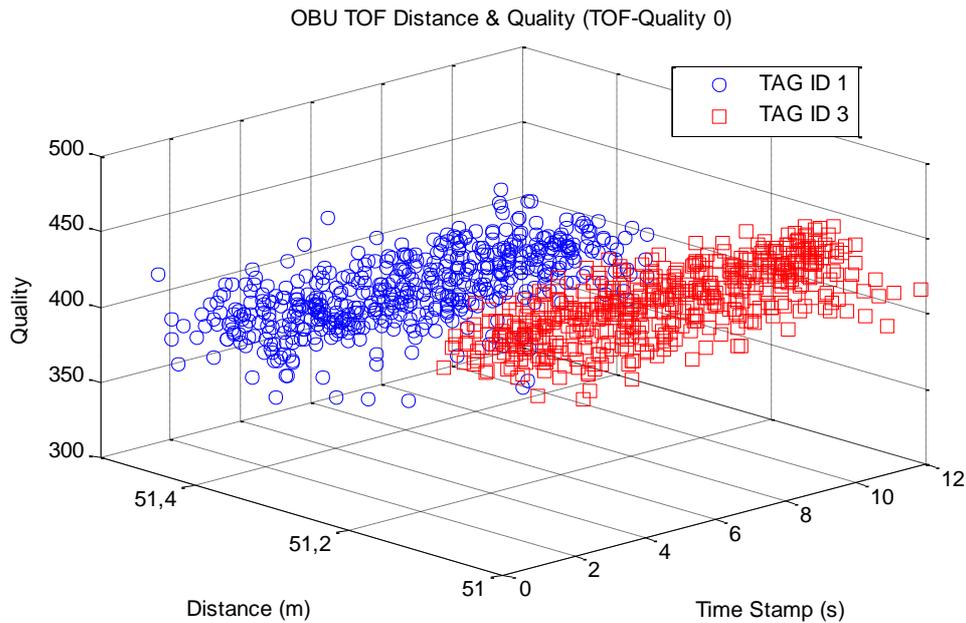


Abbildung 75: Verhalten der Abstandsmessung in einem ungestörten Kanal

### 2.5.1.2.2 Kompatibilität zu anderen Systemen

Eine Anforderung an die im Teilprojekt Ko-TAG Projekt gefertigten Funk-Hardware bestand in der Untersuchung der Kompatibilität zu vorhanden Car2X Systemen. Um diese Kompatibilität nachzuweisen, wurde zusammen mit der TUM und dem HHI Berlin ein Demonstrator entwickelt, der in der Lage ist, an der 802.11p-konformen Funk-Kommunikation des Teilprojektes Ko-Per teilzunehmen. Dazu werden empfangene Informationen grafisch über das Webinterface der Ko-TAG Geräte dargestellt. Hierbei zeigt die „Paketansicht“, wie in Abbildung 76 dargestellt, die empfangenen Nachrichten und die Decodierung der einzelnen Nachrichtfelder. Die „Kartenansicht“ in Abbildung 77 zeigt die Positionen der empfangenen Ko-PER Fahrzeuge in einer Karte. Die jeweiligen Lokalisierungsinformationen werden hierbei aus den übertragenen GPS-Daten abgeleitet.

Packet	CSV	Statistic	Map
13:32:58.304	35dB ND (22)	FC DUR ADDR1 ADDR2 ADDR3 SCTRL QoS DSAP SSAP CTRL ORGCODE ETHTYPE	00 00 00 02 26 18 02 FA 7A EC 00 BB CE A3 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:57.352	35dB ND (22)	BB 00 00 00 FF FF FF FF FF FF CC C6 89 73 51 99 FF FF FF FF FF FF 00 00 20 00	AA AA 03 00 00 00 0F AL 00 00 00 02 26 18 02 FA 7F E7 00 BB CD 72 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:57.354	35dB ND (22)	FC DUR ADDR1 ADDR2 ADDR3 SCTRL QoS DSAP SSAP CTRL ORGCODE ETHTYPE	00 00 00 02 26 18 02 FA 7A BA 00 BB CE C5 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:57.352	35dB ND (22)	BB 00 00 00 FF FF FF FF FF FF AA C6 89 73 51 99 FF FF FF FF FF FF 00 00 20 00	AA AA 03 00 00 00 0F AL 00 00 00 02 26 18 02 FA 7D D9 00 BB CD 64 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:58.420	35dB ND (22)	FC DUR ADDR1 ADDR2 ADDR3 SCTRL QoS DSAP SSAP CTRL ORGCODE ETHTYPE	00 00 00 02 26 18 02 FA 7F DA 00 BB CD 95 DC 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:58.422	35dB ND (22)	FC DUR ADDR1 ADDR2 ADDR3 SCTRL QoS DSAP SSAP CTRL ORGCODE ETHTYPE	00 00 00 02 26 18 02 FA 7A 88 00 BB CF 07 00 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:58.421	35dB ND (22)	BB 00 00 00 FF FF FF FF FF FF AA C6 89 73 51 99 FF FF FF FF FF FF 00 00 20 00	AA AA 03 00 00 00 0F AL 00 00 00 02 26 18 02 FA 7D E4 00 BB CD 50 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:59.470	35dB ND (22)	FC DUR ADDR1 ADDR2 ADDR3 SCTRL QoS DSAP SSAP CTRL ORGCODE ETHTYPE	00 00 00 02 26 18 02 FA 7F FD 00 BB CD B8 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:59.471	35dB ND (22)	FC DUR ADDR1 ADDR2 ADDR3 SCTRL QoS DSAP SSAP CTRL ORGCODE ETHTYPE	00 00 00 02 26 18 02 FA 7D F8 00 BB CD 3C 00 00 00 00 01 F4 33 11
13:32:59.472	35dB ND (22)	BB 00 00 00 FF FF FF FF FF FF BB C6 89 73 51 99 FF FF FF FF FF FF 00 00 20 00	AA AA 03 00 00 00 0F AL 00 00 00 02 26 18 02 FA 7A 56 00 BB CF 39 00 00 00 00 01 F4 33 11

Abbildung 76: Paketansicht des C2X Demonstrators

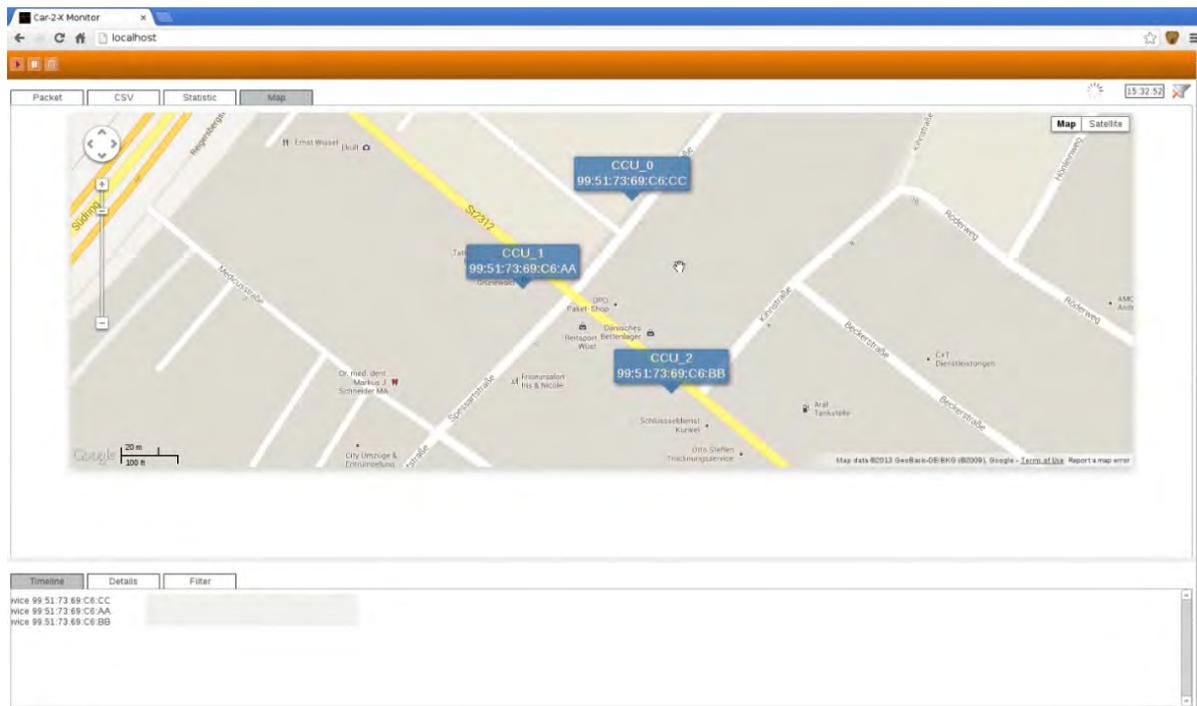


Abbildung 77: Kartenansicht des C2X Demonstrators

## 2.5.2 Optimierung Signalverarbeitung / Arbeitsplan IEEE 802.11p Konformität

### 2.5.2.1 Entwurf und Implementierung eines echtzeitfähigen digitalen Transceivers zur Car2X Funkdatenübertragung, Optimierung, Interoperabilität und Konformität mit dem IEEE 802.11p Standard.

Für die Arbeiten zur integrierten Funkkanal- und Funksystemmodellierung wurde vom HHI im Rahmen des Forschungsprojektes Ko-KOMP der Signalverarbeitungsteil eines digitalen Transceivers zur Car2X Funkdatenübertragung entwickelt und implementiert. Dabei wurde der Car2X Funkstandard IEEE 802.11p zugrunde gelegt. Zunächst war lediglich die nicht-echtzeitfähige Implementierung auf einer Matlab-Plattform geplant, da die Signalverarbeitung nur zu Simulationszwecken eingesetzt werden sollte. Im Laufe der Projektarbeit sind das HHI und die Partner aus dem Verbundprojekt Ko-TAG zur Erkenntnis gekommen, dass diese Arbeiten des HHI, bei entsprechender Anpassung, zusätzlich wichtige Beiträge für das Verbundprojekt Ko-TAG liefern können. Für die Entwicklung des transponderbasierten Schutzsystems in Ko-TAG wurde eine leistungsfähige und zuverlässige Komponente zur Funk-Datenübertragung benötigt, die in das Ko-TAG Demonstrationssystem integrierbar ist. Das HHI hat daher im Laufe der Projektarbeit seine ursprüngliche Planung bezüglich der Transceiver-Implementierung erweitert, um diesen auch als echtzeitfähige FPGA-Komponente den Projektpartnern in Ko-TAG zur Verfügung stellen zu können. Diese echtzeitfähige Transceiver-Systemkomponente trägt innerhalb des Ko-TAG Systems die Kurzbezeichnung „dPHY“.

Der dPHY Transceiver ist im Rahmen der Forschungsprojekte Ko-KOMP und Ko-TAG pragmatisch für die Lösung der konkreten Kommunikationsaufgaben entwickelt und implementiert worden. Eine vollständige Abdeckung aller gemäß dem Standard obligatorischer Funktionen und Betriebsarten wurde aus Gründen der Aufwandsbegrenzung nicht angestrebt. Stattdessen wurde eine Teilmenge der im Standard definierten Funktionen implementiert. Darüber hinaus, konnte mit dem speziell für das Ko-TAG System entwickelten dPHY Transceiver eine Verknüpfung der Funk-Datenübertragung mit den Funktechnologien zur Abstands- und Winkelmessung realisiert werden.

Von den acht möglichen Übertragungsarten, die jeweils mit einer bestimmten Übertragungsgeschwindigkeit (Datenrate) verknüpft sind (vergl. (IEEE 802.11 Working Group, 2012)), wurde nur eine einzige im dPHY realisiert. Die Beschränkung auf eine einzige Datenrate ist für die Realisierung des Ko-TAG Transpondersystems ausreichend, weil

Eine adaptive Anpassung der Datenrate an die Bedingungen des Funkkanals im Ko-TAG Systemkonzept nicht vorgesehen ist.

Bereits in der Konzeptphase eine geeignete Datenrate festgelegt werden konnte und Variationen der Datenrate zur Systemoptimierung in der Phase der Inbetriebnahme nicht als erforderlich erachtet wurden.

Bei der Auswahl der geeigneten Datenrate wurde auch der damit verbundene Implementierungsaufwand berücksichtigt. Bei einigen Datenraten werden bestimmte Funktionselemente nicht benötigt, die zur Unterstützung anderer Datenraten erforderlich sind. Hier sind z.B. die Punktierung und De-Punktierung zu nennen. Erfreulicherweise führte diese Berücksichtigung der Implementierungskomplexität nicht zu einem Zielkonflikt mit den primären Auswahlkriterien, wie der Robustheit der Übertragung und des erforderlichen Datendurchsatzes. Konkret wurde eine Datenrate von 6 Mbps bei einer Systembandbreite von 10 MHz festgelegt. Damit ist die Modulationsart der Nutzdaten auf QPSK und die Rate der Kanalkodierung auf  $\frac{1}{2}$  festgelegt.

In der Abbildung 78 sind die vereinfachten Blockschaltbilder des Senders und des Empfängers des dPHY Transceivers dargestellt.

Man erkennt die Kettenstrukturen der Signalverarbeitungselemente, die beim Sender mit dem Dateninterface E1 beginnt und mit dem E2 Interface für das generierte digitale Basisbandsignal endet. Im Empfänger beginnt die Signalverarbeitungskette mit dem Basisbandinterface E2 für das digitale Empfangssignal und endet mit dem Dateninterface E1 für die Empfangsdaten. Neben den Funktionselementen zur Signalverarbeitung enthält der Transceiver weitere Elemente für den Test und die Diagnose sowie für die Verknüpfung des Transceivers mit den weiteren funkbasierten Grundkomponenten des Ko-TAG Systems zur Abstands- und zur Winkelschätzung. Insbesondere diese gegenüber anderen Transceiver-Implementierungen vorhandenen Zusatzfunktionen machen den hier entwickelten dPHY Transceiver einzigartig.

Der Sendeteil enthält einen komplexen CW-Signalgenerator (NCO), der sich zur Messung von Signalpegeln sowie zur Phasenrauschmessung und zur Messung der Frequenzstabilität eignet. Weiterhin ist das Funktionselement „Test Signal Generator“ enthalten, das die Funktionalität eines Arbitrary Waveform Generators (AWG) besitzt. Das Ausgangssignal dieses Generators kann im Betrieb an die jeweiligen Erfordernisse bezüglich der Bandbreite, der Intensität und der Dauer angepasst werden. Es kann entweder asynchron zu Kommunikationsframes gesendet werden oder es kann synchron als Anhang zu Kommunikationsframes gesendet werden.

Im Empfänger sind ebenfalls mehrere Funktionselemente zur Systemdiagnose enthalten. Dies ist zum einen der „Test Signal Memory“, mit dem Empfangssignalsbursts direkt im Zeitbereich aufgezeichnet werden können. In dem Funktionselement „Monitor Module“ kann eine Reihe weiterer wichtiger Zwischenergebnisse der Signalverarbeitung aufgezeichnet werden. Dies sind die Kanalzustandsinformationen, die entzerrten Datensymbole, die Nutz- und Rauschsignal-Leistungswerte sowie der geschätzte Frequenzoffset zwischen Sender und Empfänger. Diese Daten können durch den assoziierten Mikrocontroller aus dem dPHY Transceiver ausgelesen werden und über die vorhandenen Datenschnittstellen geeigneten Computern mit entsprechenden Diagnoseprogrammen übermittelt werden. Neben der eigentlichen Transceiver Architektur hat das HHI auch die notwendigen Software Treiberfunktionen für die eingebettete Firmware sowie Diagnoseprogramme entwickelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Die integrierten Testfunktionen haben sich zunächst bei der Inbetriebnahme des Transceivers selbst als sehr hilfreich erwiesen, mehr aber noch bei der späteren Einbettung in die Zielplattform, die Transpondersysteme und die On-Board Unit. Die Testfunktionen konnten insbesondere zum Test der RF-Komponenten und Signalwand-

ler (aPHY) sowie zur Diagnose des Ko-TAG Demonstrationssystems bei Feldtests genutzt werden.

Für die ersten Funktionstests des dPHY Transceivers in einer rein digitalen Testumgebung wurde zusätzlich ein Funktionselement zur Funkkanalemulation entwickelt und auf einer Testbench implementiert. Damit konnte die Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit der digitalen Signalverarbeitung bei unterschiedlichen Funkkanalbedingungen getestet werden, um diese mit den Anforderungen des IEEE-Standards und mit Leistungsdaten aus der Fachliteratur vergleichen zu können.

In der Abbildung 79 sind exemplarisch Testergebnisse dieser Testbench-Implementierung dargestellt. Der linke Teil der Abbildung zeigt für eine Übertragungsrealisierung in einem Mehrwegekanal mit Line-of-sight (LOS) Signalkomponente die Kanalzustandsinformationen, das aufgezeichnete Empfangssignal im Zeitbereich sowie den Scatter-Plot der BPSK modulierten Steuerdaten (rot) und QPSK modulierten Nutzdaten (blau). Aus einer Vielzahl von getesteten Übertragungsvorgängen bei variierendem SNR wurden die Diagramme im mittleren und rechten Teil der Abbildung 79 berechnet. Diese enthalten die Häufigkeit fehlerhaft übertragener Kommunikationsframes und den Fehlerverlauf bei der Schätzung des Frequenzversatzes zwischen Sender und Empfänger. Die Auswertung dieser Testergebnisse zeigte, dass mit dem dPHY sowohl die Anforderungen des IEEE-Standards als auch die Anforderungen aus der Ko-TAG Systemspezifikation erfüllbar sind. (Die Leistungsfähigkeit der Funkkommunikation wird durch die Eigenschaften des digitalen Transceivers und der analogen RF Frontends bestimmt. Auf der Testbench wurde zunächst nur der digitale Teil untersucht. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die Anforderungen an die Ko-TAG Funk-Datenkommunikation mit den durch den Projektpartner TU-München angestrebten Leistungsdaten des analogen Frontends, bezüglich Sendeleistung, Empfänger-Empfindlichkeit (Rauschzahl) sowie Frequenzstabilität, gut erfüllbar sind.)

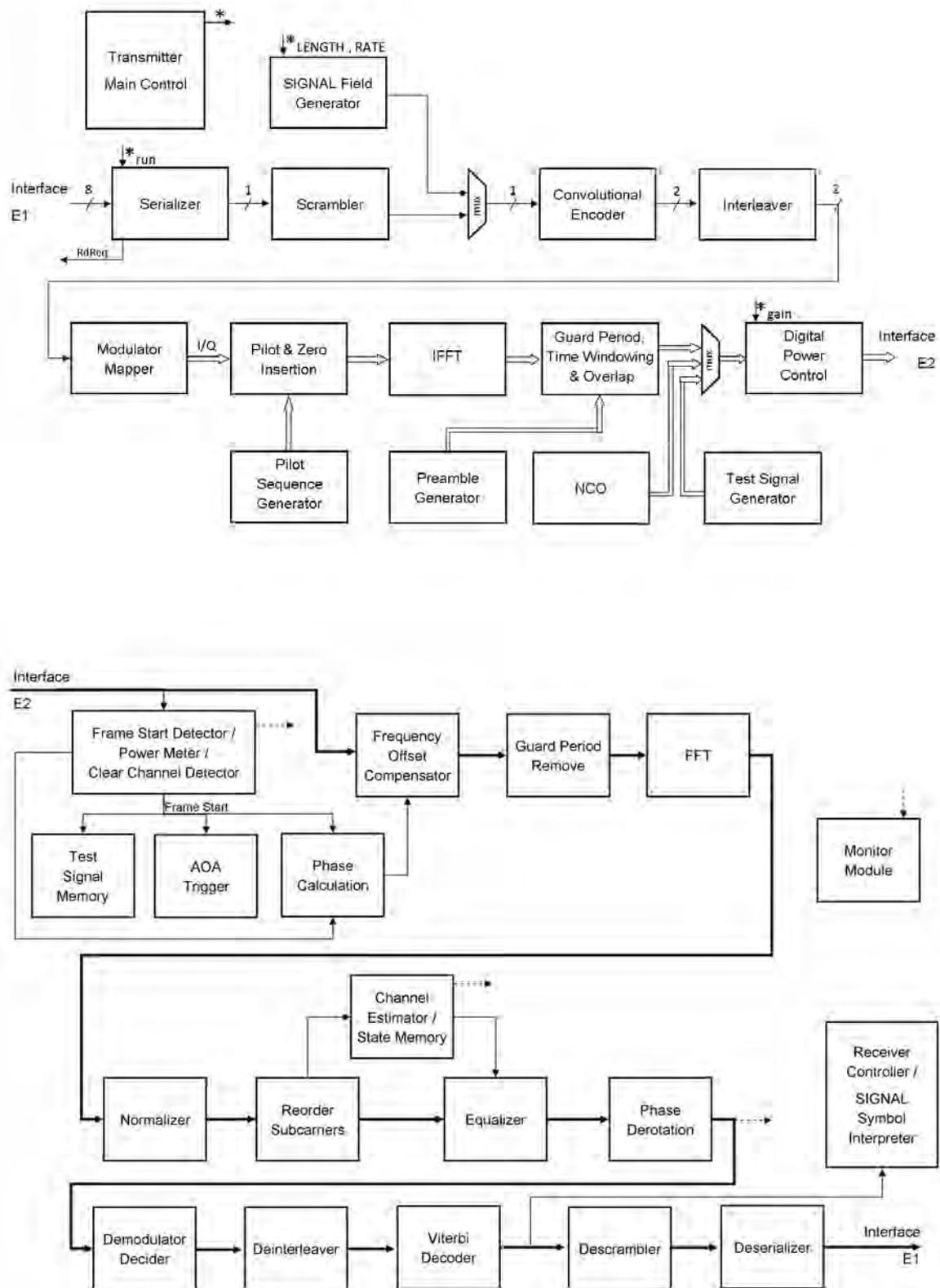
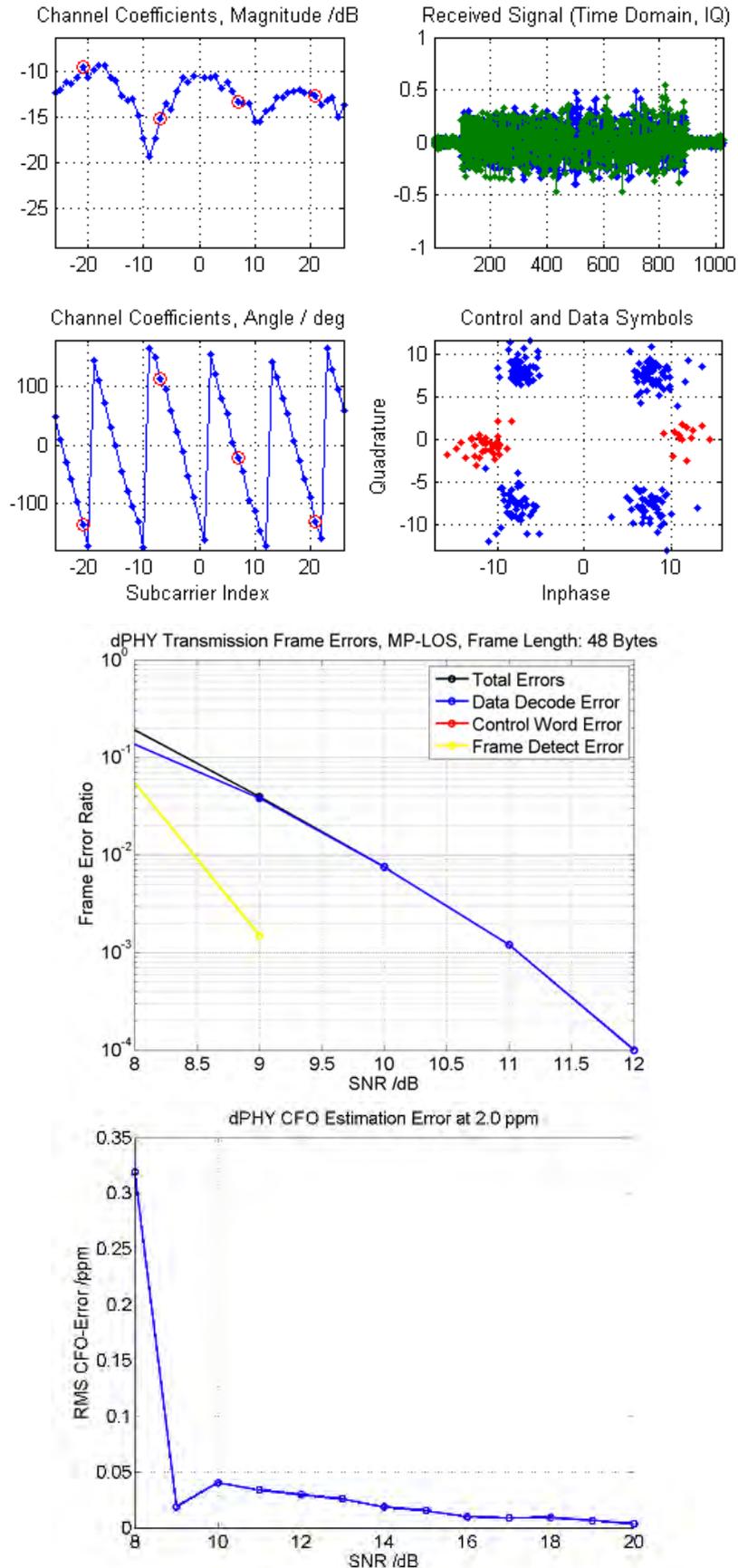


Abbildung 78: Struktur des implementierten dPHY Transceivers, oben: Sender, unten: Empfänger



**Abbildung 79: Exemplarische Ergebnisse von dPHY-Tests auf der digitalen Testbench, links: Daten aus dem Monitormodul, Mitte: Frame Error Häufigkeit über den SNR-Wert, rechts: Fehler der Frequenzoffsetschätzung in Abhängigkeit vom SNR-Wert**

Die implementierte Architektur des dPHY Transceivers wurde zusammen mit dem Firmware-Paket und der Diagnosesoftware innerhalb des Ko-KOMP Projektes (Arbeitspaket 5.4.2, Implementierung der IEEE 802.11p Signalverarbeitungsalgorithmen) durch das HHI entwickelt und im Rahmen der assoziierten Partnerschaft des HHI im Ko-TAG Projektkonsortium an die Projektpartner zur Nutzung übergeben. In diesem Rahmen wurde vom HHI ebenfalls die Integration dieser Funktionselemente in die Geräte des Ko-TAG Demonstrationssystems unterstützt. In der Verlängerungsphase des Ko-TAG Projektes wurde das HHI als regulärer Projektpartner in das Konsortium aufgenommen. In diesem Rahmen konnten weitere Arbeiten mit bzw. an dem dPHY Transceiver durchgeführt werden.

Im Ko-TAG Arbeitspaket 6.2.1, Optimierung der Signalverarbeitung, wurde die Signalverarbeitung zur Detektion der Signalpräambel bei der Framestart-Detektion im Empfänger überarbeitet, um die Übertragungsqualität des Systems zu verbessern. Dabei wurden spezielle Effekte des analogen RF-Frontends, insbesondere durch die Wirkung des AGC-Algorithmus, in der digitalen Signalverarbeitung berücksichtigt, die anfangs die Zuverlässigkeit der Präambel-Detektion bei geringen Distanzen zwischen Sendern und Empfängern begrenzt hatten. Diese Verbesserungen waren sehr wirksam, so dass die Datenübertragung sowohl bei geringen als auch großen Distanzen anschließend sehr zuverlässig funktionierte.

Weiterhin wurde im Rahmen der Ko-TAG Projektarbeit getestet, ob der implementierte Funktionsumfang des dPHY Transceiver kompatibel zu anderen standardkonformen IEEE 802.11p Transceivern ist. Dieser Test wurde durchgeführt, um festzustellen, ob eine Interoperabilität des dPHY mit anderen Car2X Funksystemen möglich ist. Zu diesem Zweck wurden Kommunikationstests mit zwei Kommunikationseinheiten, sog. CCU, aus dem Projekt Ko-PER durchgeführt. Diese Geräte wurden im Rahmen des Forschungsprojektes SimTD entwickelt und enthalten zur Unterstützung der Car2X Kommunikation IEEE802.11p konforme Transceiver Baugruppen der Fa. Cohda Wireless Ltd. Die Geräte sowie die erforderlichen Zusatzkomponenten, wie Antennen und Kabel, wurden dem HHI vom Projektpartner Daimler AG zur Durchführung der Tests zur Verfügung gestellt.

Zusammenfassend konnte nach der Auswertung der Tests festgestellt werden, dass die Interoperabilität des dPHY Transceivers mit den Ko-PER CCUs auf der Ebene der physikalischen Schicht uneingeschränkt möglich ist. Zur Erreichung der Kompatibilität waren jedoch einige kleine technische Änderungen innerhalb der dPHY-Architektur erforderlich, woraus die finale dPHY-Version 22 hervorgegangen ist. Die Möglichkeit zur Interoperabilität zwischen den Ko-TAG Geräten und den Ko-PER CCUs wurde durch eine Applikation des Projektpartners Steinbeis Innovationszentrum für Embedded Design und Networking (SIZEDN) bei der Ko-FAS Abschlussdemonstration in Aschaffenburg gezeigt. Dabei wurden die gesendeten Kommunikationsdaten der Ko-PER CCUs der Versuchsfahrzeuge mit dem dPHY in einem Ko-TAG Transponder empfangen, dekodiert und gemäß der übertragenen Positionsdaten der Versuchsfahrzeuge in eine Straßenkarte eingetragen.

Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen sollte in einem weiteren Unterarbeitspaket ermittelt werden, welcher Arbeitsaufwand damit verbunden wäre, den dPHY weiter zur vollständigen Kompatibilität mit den im IEEE 802.11p Standard definierten Übertragungsarten zu entwickeln. Dies bedeutet nicht die vollständige Kompatibilität mit allen Aspekten des Standards, gemäß den Prüfvorschriften in (IEEE 802.11 Working Group, 2012), Anhang B. Das Ergebnis der Weiterentwicklung wäre weiterhin eine experimentelle Implementierung der Übertragungstechnik, die jedoch gegenüber dem derzeitigen Entwicklungsstand einen erweiterten Funktionsumfang aufweisen würde. Dies wäre insbesondere vorteilhaft oder erforderlich, wenn die Ko-TAG Technologie mit anderen Verkehrssicherheitssystemen auf einer gemeinsamen Plattform fusioniert werden soll, die ebenfalls auf der Car2X Funktechnologie basieren. Hier wären z.B. die kooperativen Sicherheitssysteme des Projektes Ko-PER und SimTD zu nennen.

Für diese Aufwandsabschätzung wurden vier verschiedene Lösungsvarianten für unterschiedliche Anforderungen erarbeitet und kalkuliert. Zusammenfassend kann man sagen, dass der Arbeitsaufwand, der in einer späteren Projektinitiative für die standardkonforme

Weiterentwicklung des dPHY entstehen würde, für die verschiedenen Lösungsvarianten voraussichtlich im Bereich zwischen 8 und 12 PM liegen würde.

### 2.5.2.2 Optimierung der Empfänger-Signalverarbeitung für stark zeitvariante Funkkanäle

Es wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt für die Identifizierung von Verfahren, die zur Verbesserung der Übertragungsqualität führen können. Channel-Tracking Algorithmen zielen auf den Schwachpunkt der aktuellen Empfänger-Signalverarbeitung nämlich einer zuverlässigen und erfolgreichen Kanalschätzung. Entsprechend erfolgreich ist anschließend die Dekodierung. Channel-Tracking beschreibt Verfahren, die die Änderungen des zeitvarianten Kanals „verfolgen“, z.B. iterativ oder kontinuierlich schätzen. Anstatt der aktuellen LSE (least squares estimation) wurde der Vorschlag eines DFE (decision feedback equalizer) verfolgt. Unterschiedliche Ansätze für die Implementierung eines DFE sind in Abbildung 80 abgebildet. In (Abdulhamid, Abdel-Raheem, & Tepe) wurde auch gezeigt, dass DFE nach dem Viterbi Decoder die beste Ergebnisse bezüglich Channel-Tracking und resultierende FER (frame error rate) liefert, verglichen mit DFE nach dem Demapper. Dieses Verfahren wurde implementiert und die resultierende Empfängerstruktur ist in Abbildung 81 abgebildet. Dieses Verfahren nutzt die aktuelle und die früheren Kanalschätzungen (mit Tiefe 1) und die Information aus dem Viterbi Decoder um mit einer LMSE (least mean square estimation) das neue Symbol zu entzerren. Dabei bestimmt der Faktor alpha das Gewicht der früheren Schätzung im Verhältnis mit der aktuellen.

Dieses Verfahren wurde mit Hilfe von Messdaten getestet und die Ergebnisse sind vielversprechend. Dabei wurden Messungen für Szenarien mit hoher Zeitvarianz durchgeführt um die Grenzen des Algorithmus zu testen. Typische solche Szenarien sind HOT (highway oncoming traffic) mit sehr hoher Geschwindigkeit oder auf der Stadtautobahn, wo die hohe Geschwindigkeit mit starker Mehrwegausbreitung kombiniert wird.

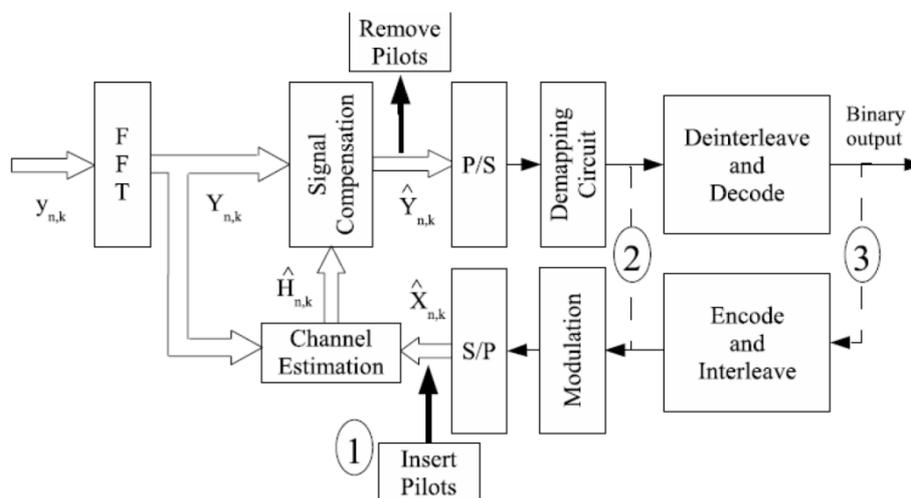


Abbildung 80: Drei grundlegende Channel-Tracking Verfahren (Abdulhamid, Abdel-Raheem, & Tepe)

(1) Pilotinterpolation (2) DFE nach dem Demapper (3) DFE nach dem Viterbi Decoder

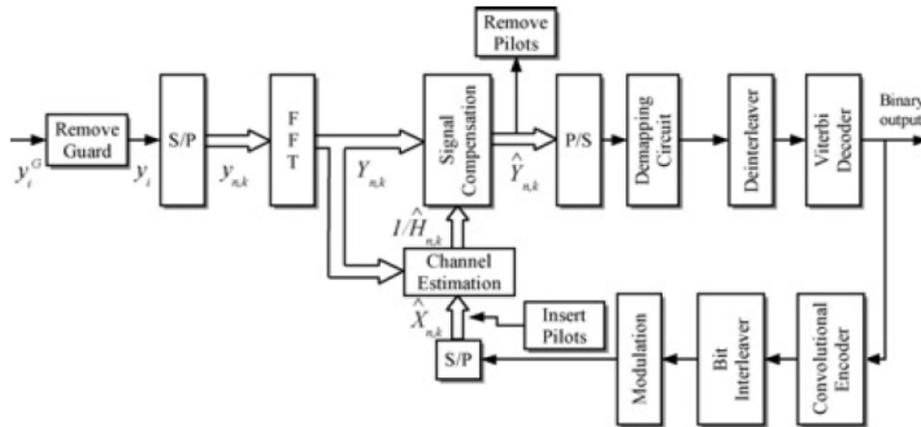


Abbildung 81: Implementierte Empfängerstruktur mit DFE

## 2.6 Ergebnisse und Fahrzeuganwendungen

### 2.6.1 Testmessungen

#### 2.6.1.1 Bereitstellung Testumgebung

Neben einer Vielzahl an Erprobungskampagnen im öffentlichen Straßenverkehr wurden wesentliche Auslegungstests im Continental Safety Park von CSEI durchgeführt

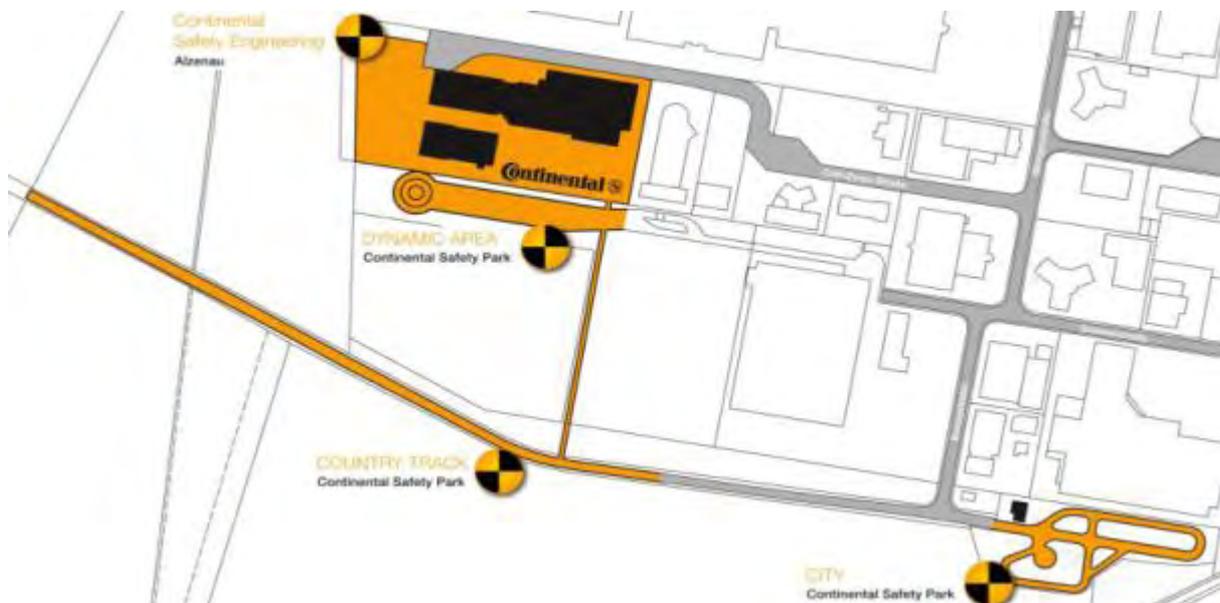


Abbildung 82: Übersicht Continental Safety Park

Der Continental Safety Park ermöglicht verschiedenste Tests für die Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen und aktiven Fahrzeugsicherheitsystemen. Das Testfeld ist für Tests von niedriger bis mittlerer Geschwindigkeit ausgelegt und umfasst drei Bereiche:

<p><b>Dynamic Area</b></p> <p>Die Dynamic Area zeichnet sich besonders durch die Fußgängertestanlage aus. Außerdem findet man hier verschiedene Fahrbahnbeläge mit unterschiedlichen Eigenschaften.</p> <p>Dimensionen:            120m x 20m</p>	
<p><b>City Area</b></p> <p>Im City Bereich können alltägliche innerstädtische Verkehrsszenarien nachgestellt werden. So befindet sich in diesem Bereich beispielsweise eine Straßenkreuzung mit einer Ampelanlage.</p>	
<p><b>Country Track</b></p> <p>Auf dem Country Track ist es möglich Tests mit höheren Geschwindigkeiten in realer Landstraßenumgebung durchzuführen.</p>	

**Abbildung 83: Bereiche des Continental Safety Parks**

#### 2.6.1.2 Durchführung Messungen

Zur Feststellung der Leistungsfähigkeit des Ortungsverfahrens wurden unterschiedlichste Testkampagnen mit unterschiedlichen Fahrzeug-Verdeckungsszenarien durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf PKW-Verdeckungen, es wurden aber auch Bus-Verdeckungen untersucht. Versuche mit unterschiedlichen Verdeckungsfahrzeugen zeigten, dass die Fahrzeuggeometrie eine große Rolle bei der Signalausbreitung der Ko-TAG Daten spielt.

Im Folgenden sind beispielhaft 2 Versuchsszenarien beschrieben, stellvertretend für die Vielzahl an Testszenarien, die im Rahmen von Ko-TAG nachgebildet wurden:

##### Testszenario 1:

Die Position des Transponders wurde für  $x=0,7$  bis 2m und  $y=0,5$  bis 1m variiert. Außerdem wurden verschiedene Transponderhöhen von 0,3 bis 1m untersucht. Nachfolgend erfolgt jeweils eine skizzierte Darstellung des Testaufbaus mit den dazugehörigen aufgezeichneten Messdaten. Abbildung 5 zeigt den Rohdatenverlauf des georteten Transponders (x- und y-Position) bei einer langsamen Geradeausfahrt mit PKW-Verdeckung.

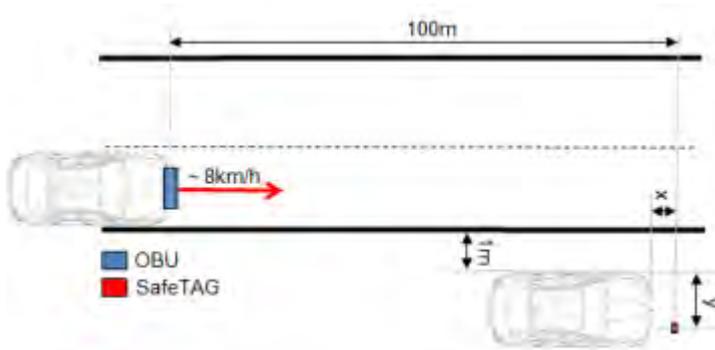


Abbildung 84: Szenario PKW-Verdeckung

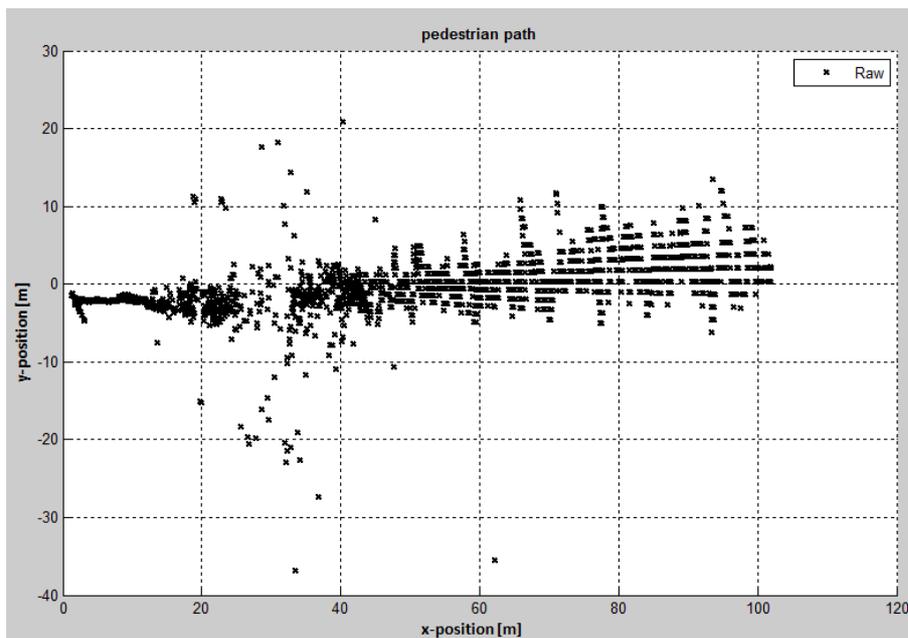


Abbildung 85: Rohdatenverlauf bei PKW-Viertelverdeckung

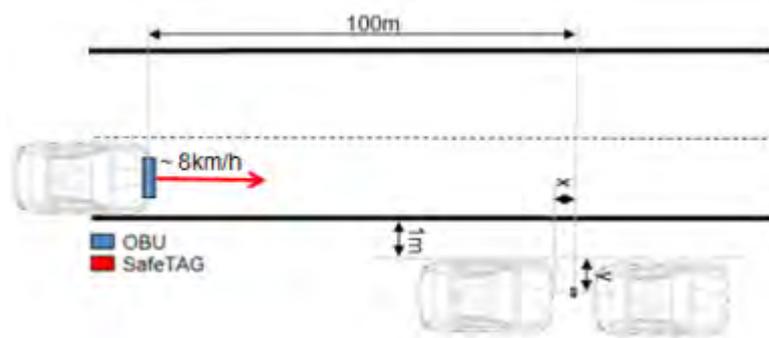


Abbildung 86: Szenario Parklücke

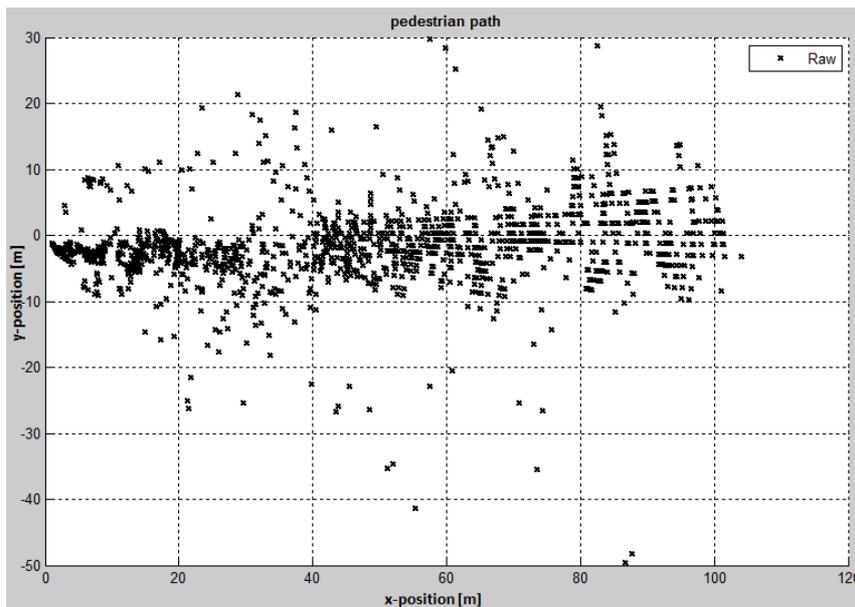


Abbildung 87: Rohdatenverlauf bei parklückenähnlicher PKW-Viertelverdeckung

#### Testszenario 2:

Während vor bzw. hinter einem PKW stehende Personen ab einer gewissen Position vom herannahenden Fahrzeug aus optisch wahrnehmbar sind, verhält sich die Busverdeckung wegen der Höhe des Busses dahingehend wie eine Wand. Personen, die durch einen haltenden Reisebus verdeckt sind, können vom Fahrer eines PKW, der sich in die gleiche Fahrtrichtung bewegt, erst dann wahrgenommen werden, wenn sich die beiden Fahrzeuge annähernd auf gleicher Höhe befinden. Dies ändert sich wie Abbildung 9 beweist durch den Einsatz kooperativer Transpondertechnik. Der Verlauf der Rohdaten stabilisiert sich im Vergleich zur Freifeldmessung oder ähnlichen Verdeckungen durch PKW mit einem Entfernungswert von ca. 20m zwar später als bei PKW-Verdeckungen, generiert dennoch einen entscheidenden Sicherheitsvorteil.

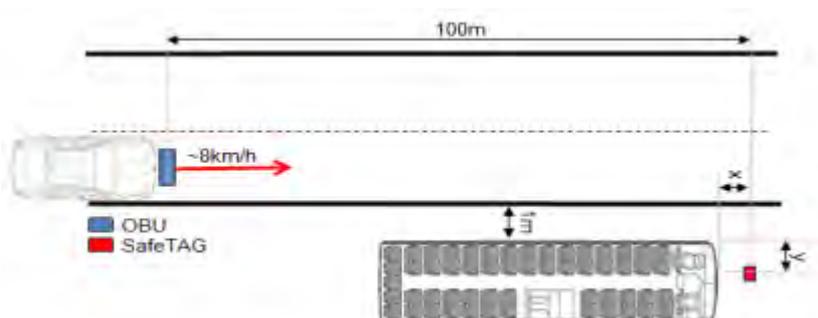
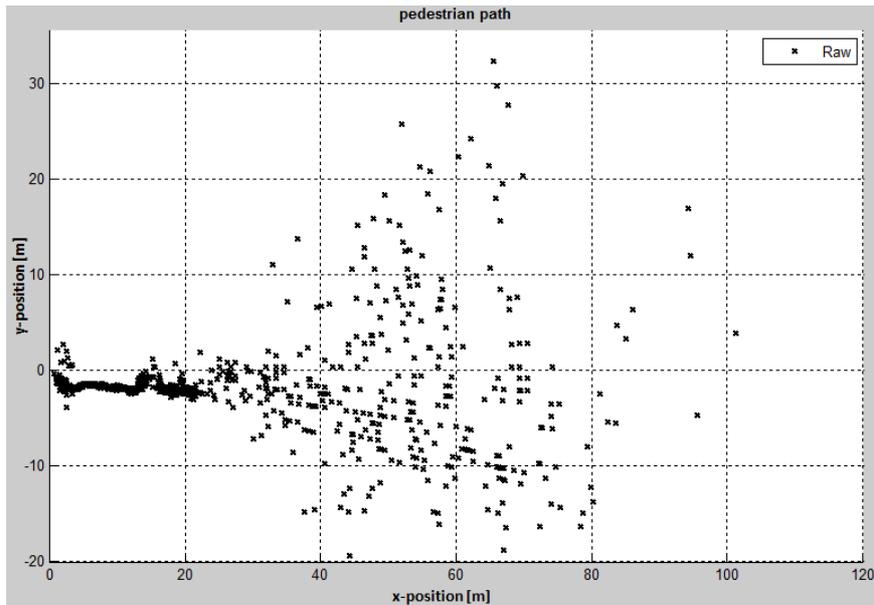


Abbildung 88: Szenario Busverdeckung



**Abbildung 89: Rohdatenverlauf bei Bus-Viertelverdeckung**

### 2.6.1.3 Bewertung Ergebnisse

Zur Bewertung der Messergebnisse wurden verschiedenste Auswerte-Skripte beispielsweise in Matlab entwickelt, um die Messdaten aus den vielen statischen, halbstatischen und dynamischen Testkampagnen statistisch auszuwerten.

Eine detaillierte Übersicht über die Auswertung der Ergebnisse ist im [Ko-TAG Abschlussbericht CSEI] zu finden.

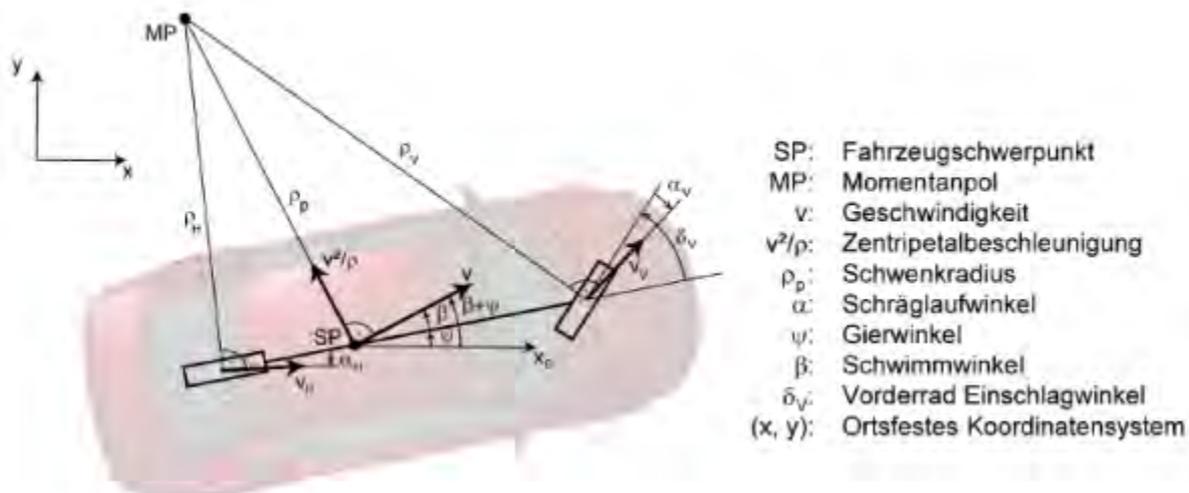
## 2.6.2 Umfeldmodelle

### 2.6.2.1 Modell Ego Fahrzeug

Das Modell des Ego-Fahrzeugs wurde auf Basis der Theorie des linearen Einspurmodells entwickelt. Bei diesem Modell wird von einer starren Hinterachse und einer lenkbaren Vorderachse ausgegangen und das Fahrzeug von den tatsächlichen 2 Spuren auf 1 Spur reduziert. Im Wesentlichen werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Die Räder an den beiden Achsen werden jeweils durch ein einzelnes Rad ersetzt, so dass nur eine mittlere Spur berechnet wird.
- Der Schwerpunkt des Fahrzeugs wird in Fahrbahnhöhe angenommen. Die im Schwerpunkt angreifende Zentrifugalkraft verändert somit nicht die Radlasten und es kann kein Nicken und Wanken modelliert werden.
- Es wird ein lineares System vorausgesetzt, d.h. die Reifenseitenkraft wird proportional dem Schräglaufwinkel angenommen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die kinematischen Größen des Einspurmodells.



- SP: Fahrzeugschwerpunkt
- MP: Momentanpol
- v: Geschwindigkeit
- $v^2/\rho$ : Zentripetalbeschleunigung
- $\rho_p$ : Schwenkradius
- $\alpha$ : Schräglaufwinkel
- $\psi$ : Gierwinkel
- $\beta$ : Schwimmwinkel
- $\delta_v$ : Vorderrad Einschlagwinkel
- (x, y): Ortsfestes Koordinatensystem

**Abbildung 90: Kinematische Größen am linearen Einspurmodell**

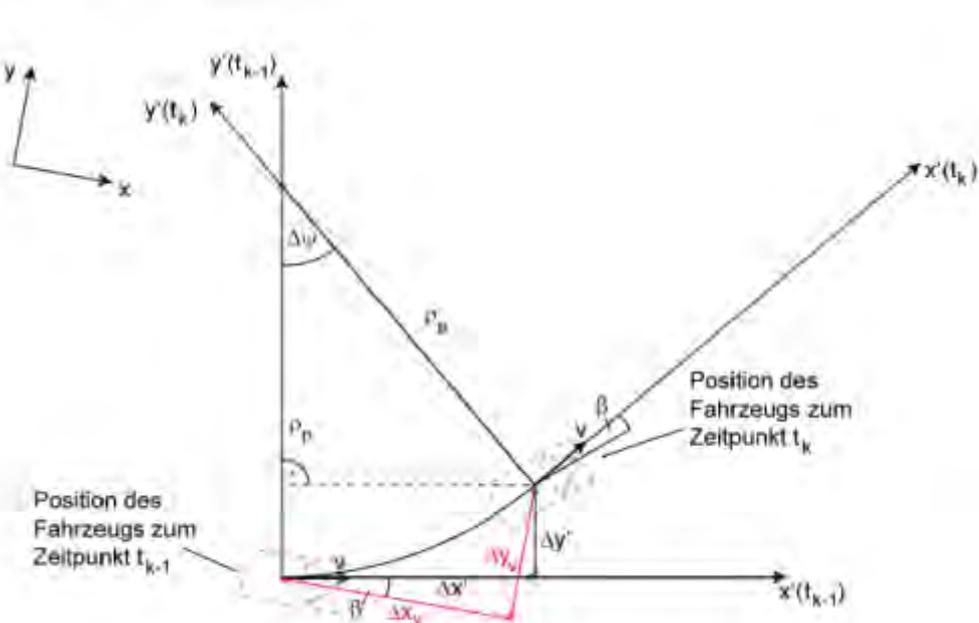
In einem Zeitinkrement hat sich das Fahrzeug und somit auch das fahrzeuggebundene Koordinatensystem um den Gierwinkel  $\Delta\psi$  gedreht. Zusammen mit dem berechneten Schwenkradius  $\rho_p$  lässt sich die vom Fahrzeug zurückgelegte Strecke im ortsfesten Koordinatensystem berechnen. Wenn der Schwimmwinkel  $\beta$  ungleich Null ist, muss die Positionsänderung zusätzlich in das eigentliche Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_v \\ \Delta y_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\Delta\psi) \\ (1 - \cos(\Delta\psi)) \end{bmatrix} \cdot \rho_p$$

Die Drehung des Fahrzeugs beträgt:

$$\Delta\psi = \dot{\psi} \cdot \Delta t$$

Die mathematischen Zusammenhänge werden in Abbildung 2 nochmals verdeutlicht.



**Abbildung 91: Zurückgelegter Weg des Fahrzeugs in einem Zeitintervall**

### 2.6.2.2 Bewegungsmodell Fußgänger

Die Auswahl der Probanden für die Durchführung der empirischen Studien zum Bewegungsmodell Fußgänger erfolgte über das Design-of-experiments (DOE) Verfahren. Dadurch sollte eine möglichst repräsentative Auswahl an Probanden erzielt werden.

Um das Bewegungsvermögen empirisch zu ermitteln, mußten die Probanden eine Vielzahl an Testkonfiguration durchlaufen. Dadurch sollten die wesentlichen Kennwerte über Beschleunigungs- und Drehvermögen von Fußgängern ermittelt werden.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Testszenarien vereinfacht zusammengefasst:

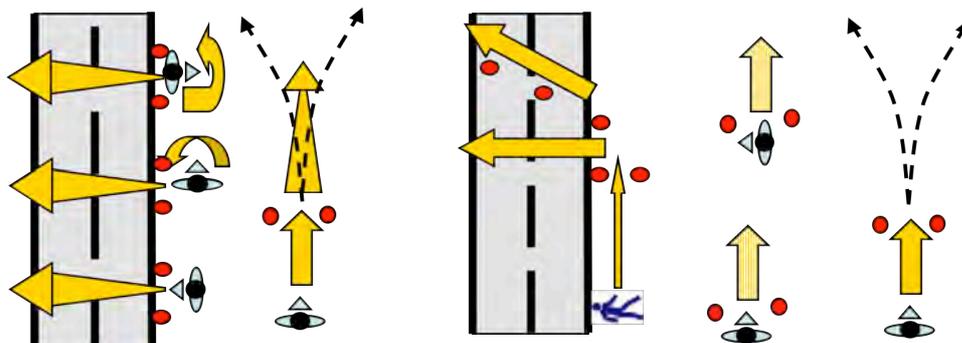


Abbildung 92: Testszenarien Bewegungsmodell Fußgänger

Die Daten der Lauftests wurden statistisch ausgewertet. Dabei wurden verschiedene Zusammenhänge zwischen dem aktuellen Bewegungszustand und der dabei möglichen Bewegungsänderung ermittelt. Beispielhaft ist in der nachfolgenden Grafik der Zusammenhang zwischen IST-Geschwindigkeit und maximal möglicher Beschleunigung dargestellt:

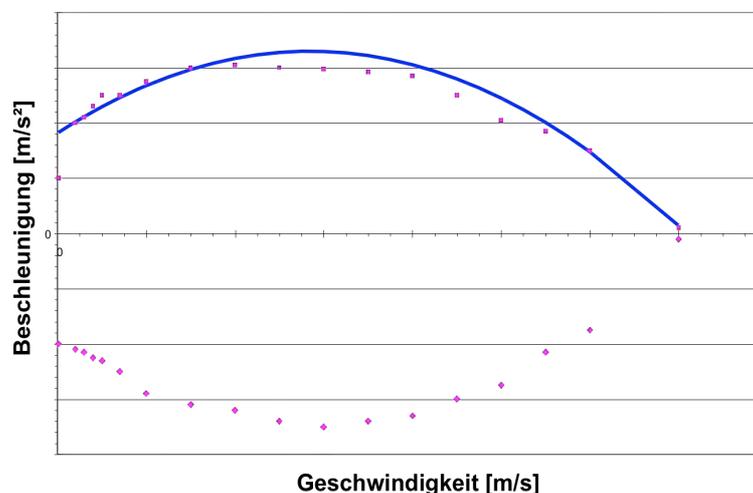


Abbildung 93: Relation IST-Geschwindigkeit zu möglicher Beschleunigung

### 2.6.2.3 Bewegungsmodell Radfahrer

Das Bewegungsmodell Radfahrer wurde ebenfalls auf Basis empirischer Probandenversuche entwickelt. Dabei wurde versucht wiederum einen repräsentativen Ausschnitt der Bevölkerung bei der Auswahl der Probanden abzubilden.

Die tatsächliche Verteilung der Probanden war wie folgt:

- Alter: 14 ... 74 Jahre
- Geschlechterverteilung: 32% Frauen und 68% Männer

Zur Ermittlung des Bewegungsvermögens wurde ein Test-Fahrrad mit Inertialmesstechnik ausgerüstet. Parallel wurde die Bewegung des Fahrrads von fest installierten Laserscannern verfolgt und aufgezeichnet.

Mit diesem Testfahrrad wurden nachfolgend dargestellte Fahrscenarien gefahren:

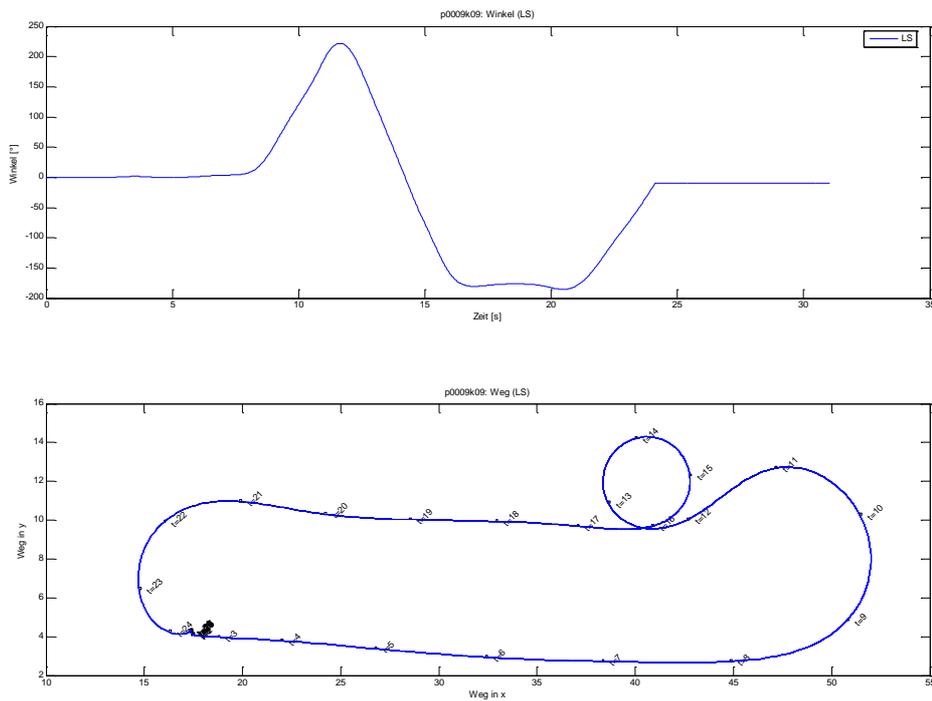
Nr.	Aufgabe		Aus dem ...	Darstellung
1 2 3	Maximale Beschleunigung	a_max	Fahren 0 Km/h 15 Km/h 20 Km/h	
7 8 9	Aus stabiler Kreisbahn starke richtungsänderung		10 Km/h 15 Km/h (20 Km/h)	
10 11	Aus stabiler Kreisbahn geradeausfahrt		10 Km/h 15 Km/h	
13 14 15	Abruptes Ausweichen einer Schikane		10 Km/h 15 Km/h (20 Km/h)	
16 17 18	Maximale Verzögerung Verzögerung	bis v=0	10 Km/h 15 Km/h 20 Km/h	
19 20 21	Durchlaufen einer Kurve mit möglichst kleinem Radius mit Verzögerung in der Kurve		10 Km/h 15 Km/h (20 Km/h)	

Abbildung 94: Testkonfigurationen Radfahrtests

Die Auswertung der Messdaten erfolgte in einer Matlab / Simulink Umgebung mit unterschiedlichen Filterverfahren. Typische Auswertungskurven sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Mit dem aus den Messdaten entwickelten Modell kann die Beschleunigung und die erzielbare Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit der vorliegenden IST-Geschwindigkeit ermittelt

werden.



**Abbildung 95: Gefilterte Messdaten aus ausgewählten TestszenarienModell Fremd-PKW**

#### 2.6.2.4 Modell Fremd-PKW

Ein Fahrzeug ist in seiner Dynamik und Manövrierfähigkeit beschränkt, was auf das Fahrzeugkinematikkonzept zurückzuführen ist. Bei der Modellierung einer Fahrzeugbewegung müssen diese Bewegungseinschränkungen berücksichtigt werden, um den Bewegungsspielraum eines Fahrzeugs möglichst real abzubilden. Im Rahmen einer Testkampagne wurde das Fahrverhalten mehrerer Probanden in typischen Fahrsituationen aufgezeichnet und daraus der typische Bewegungsspielraum eines Personenkraftwagens für den Normal-Fahrer aufgestellt (siehe Abbildung 3). Ausgewertet wurden die longitudinale Beschleunigung  $a_x$  und die Gierrate  $\dot{\psi}$  bei Geschwindigkeiten bis 30 m/s. Die Ergebnisse wurden in Lookup-Tables hinterlegt, auf die von den verschiedenen Algorithmen mit wenig Aufwand zugegriffen werden kann.

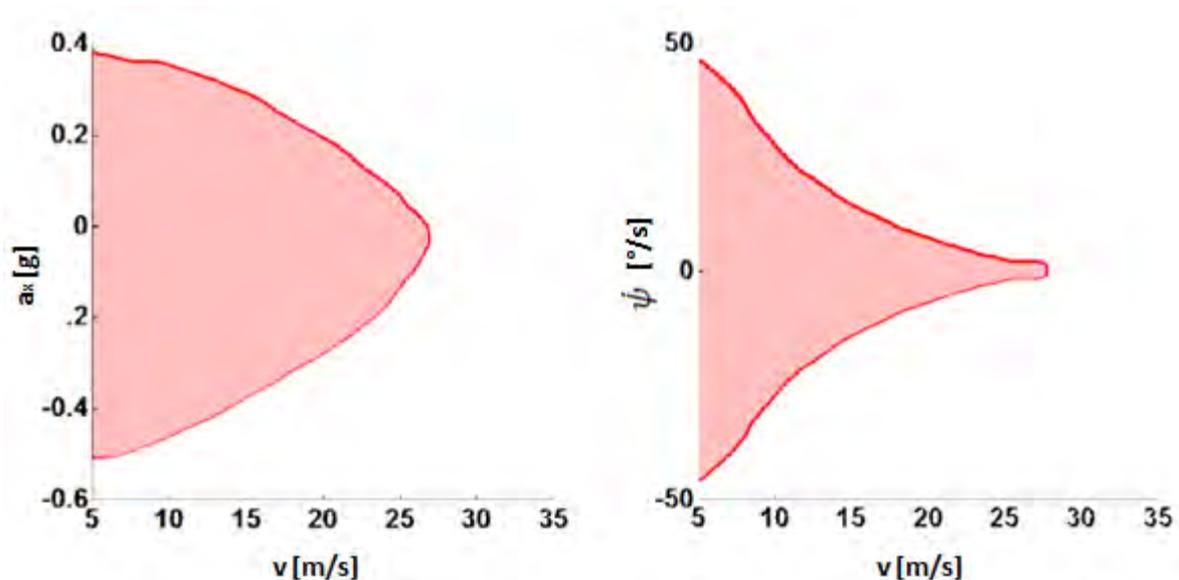


Abbildung 96: Fahrzeug-Bewegungsspielraum eines Durchschnittsfahrers bis 30 m/s System VRU Schutz

## 2.6.3 System VRU-Schutz

### 2.6.3.1 Fusion für VRU Schutz

Durch die Verwendung unterschiedlicher Sensoren zur Fahrzeugumfelderfassung stehen dem Schutzsystem mehr Informationen zur Verfügung, auf deren Grundlage die Zustandsbestimmung von Objekten und die jeweils entsprechende Systemaktion erfolgen. In der verwendeten Architektur stehen hierfür zum einen die erkannten Objekte des Bildverarbeitungssystems und die kommunizierten Daten der Inertialsensorik zur Verfügung.

#### Fusionsarchitektur

Bei Datenfusionsarchitekturen wird unterschieden, auf welcher Ebene der Signalverarbeitung die Daten fusioniert werden. Bei der Verfolgung von Objekten kann dies auf der Ebene der vorverarbeiteten Messdaten, auf der Ebene der Tracks oder hybrid auf beiden Ebenen vorgenommen werden.

Aus den speziellen Eigenschaften der kooperativen Sensorik und den Anforderungen für den VRU-Schutz wurde die Fusionsarchitektur in Abbildung 97 abgeleitet. Die Messwerte der Inertialsensorik werden direkt im Objektverfolgungsalgorithmus der Ko-TAG Ortung fusioniert (Fusion auf Ebene der Messungen). Die in der videobasierten Bildverarbeitung erkannten Objekte werden separat getrackt und anschließend mit den Tracks der kooperativen Ortung fusioniert (Fusion auf Ebene der Tracks).

#### Fusion mit Bildverarbeitung

Ein Vorteil der Fusion auf Track-Ebene ist der verringerte Kommunikationsbedarf, da jeder Sensor nur in gewissen Zeitabständen die Zustände seiner erkannten Objekte übermitteln muss. Weiterhin ist der Fusionsalgorithmus unabhängig von den spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Sensoren und ist vergleichsweise robust gegenüber Ausreißern.

Die verwendete Architektur wird der Tatsache gerecht, dass Sensoren häufig getrennt voneinander entwickelt werden. Dabei wird das Objekttracking teilweise bereits im Sensor integriert und kann vom Hersteller auf die spezifischen Eigenschaften seines Sensors optimiert werden. Dies ist in vielen kommerziellen Bildverarbeitungssystemen der Fall, sodass keine Möglichkeit besteht auf ungefilterte Messwerte zuzugreifen.

Das eingesetzte Bildverarbeitungssystem stellt bereits getrackte Objekte ohne Kovarianzangabe bereit. Auf Grund der fehlenden Kovarianzschätzung der videobasierten Bildverarbeitung, ist keine genauere Schätzung durch Kompensation der Korrelation der Tracks zu erwarten. Daher wird die Fusion von unter der Annahme von unabhängigen Tracks vorgenommen.

$$\hat{x} = \hat{x}^c + \mathbf{P}^c(\mathbf{P}^c + \mathbf{P}^k)^{-1}(\hat{x}^k - \hat{x}^c)$$

$\hat{x}$  ... fused state

$\hat{x}^k, \hat{x}^c$ ... states of Ko-TAG and camera tracking

$\mathbf{P}^k, \mathbf{P}^c$ ... covariances of Ko-TAG and camera tracking

Da keine näheren Informationen über den eingesetzten Trackingalgorithmus der Bildverarbeitung vorhanden sind, ist die Nearest Neighbor-Assoziation ohne Einbeziehung vergangener Zustände eine stabile Lösung zur Datenfusion. Zur weiteren Vorbeugung von Instabilitäten wird auf den Einsatz einer Zustandsrückkopplung zwischen fusioniertem Track und dem Ko-TAG Trackingalgorithmus verzichtet.

### Fusion mit kommunizierten Daten der Inertialsensorik

Die SafeTAGs verfügen über eine Inertialsensorik, die Zusatzinformationen über den Bewegungszustand des TAGs liefert. Da mit Hilfe dieser Messwerte keine Lokalisierung im Bezug zum Fahrzeug möglich ist, kommt eine Fusion mit dem Ko-TAG System nur auf Ebene der Messdaten in Frage. Hinzu kommt, dass die Messwerte genau einem Safe-TAG zugeordnet werden können und somit der Schritt der Datenzuordnung entfällt.

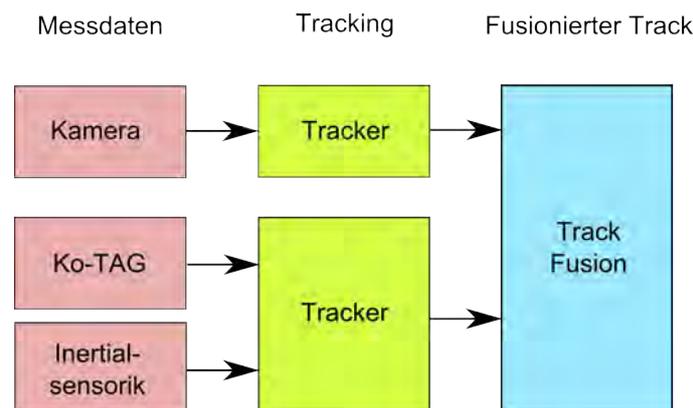


Abbildung 97: Fusionsarchitektur für VRU-Schutz

### Vorteile und Leistungssteigerung durch Fusion

Im Allgemeinen wurden folgende Vorteile durch die Fusion nachgewiesen:

Fusion mit videobasierter Objekterkennung:

- Die Bildverarbeitung arbeitet konkurrierend zum Ko-TAG System, wenn der VRU von beiden Systemen erkannt wird. Damit lässt sich eine höhere Genauigkeit in der Positionsbestimmung sowie der Klassifikation des VRUs erreichen. Darüber hinaus kann der VRU auch in Situationen erkannt werden, wenn eines der beiden Systeme versagt (z.B. Fußgänger ohne SafeTAG, Verdeckung/Teilverdeckung des Fußgängers, Fahrt bei Nacht). In diesem Fall arbeiten beide Systeme komplementär und erweitern die vom Gesamtsystem adressierbaren Situationen.
- Entlastung des kooperativen Messsystems, da für gleiche Genauigkeit weniger kooperative Messungen notwendig sind. Beispielsweise kann die Anzahl der kooperativen Winkelmessungen deutlich herabgesetzt werden, wenn der Winkel zeitgleich durch eine Kamera mit wesentlich höherer Genauigkeit bestimmt wird.

Fusion mit Inertialsensorik:

- Durch die Kommunikation von Messwerten einer Inertialsensorik lässt sich die Zustandsschätzung weiter verbessern. Insbesondere profitiert die Schätzung der Ausrichtung von der Kommunikation der Drehraten eines Fußgängers.
- Durch die Bestimmung der Drehraten und Beschleunigungen ist es möglich die Art des Verkehrsteilnehmers und dessen aktuellen Bewegungszustand zu klassifizieren. Diese Information führt zu einer Optimierung des Bewegungsmodells und folglich zu einer Verbesserung der Zustandsschätzung. Der Effekt zeigt sich insbesondere bei Übergängen von Bewegungszuständen, z.B. Gehen zu Stehen.

### 2.6.3.2 Auslösealgorithmen

Im Rahmen des Ko-TAG Projektes wurden seitens CSEI verschiedene Algorithmus Module entwickelt, die eine adäquate Schutzreaktion auf eine vorliegende Gefahrensituation ermöglicht.

Folgende wesentlichen Module wurden dabei entwickelt:

- Sensorfusionsmodul zur Fusion der Ko-TAG Ortungsdaten mit den bordautonomen Sensoren Radar und Mono-Kamera
- Objekterkennungsmodul zur Fußgängererkennung und Klassifizierung auf Kamera-Basis
- Tracking-Module unter Berücksichtigung der menschlichen Bewegungsfähigkeit (Bewegungs-Modell)
- Kollisionsrisikomodule zur Einschätzung des vorliegenden Kollisionswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Bewegungsspielräume der „betroffenen“ Verkehrspartner

Die Systemarchitektur und die Verschaltung der oben genannten Module ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

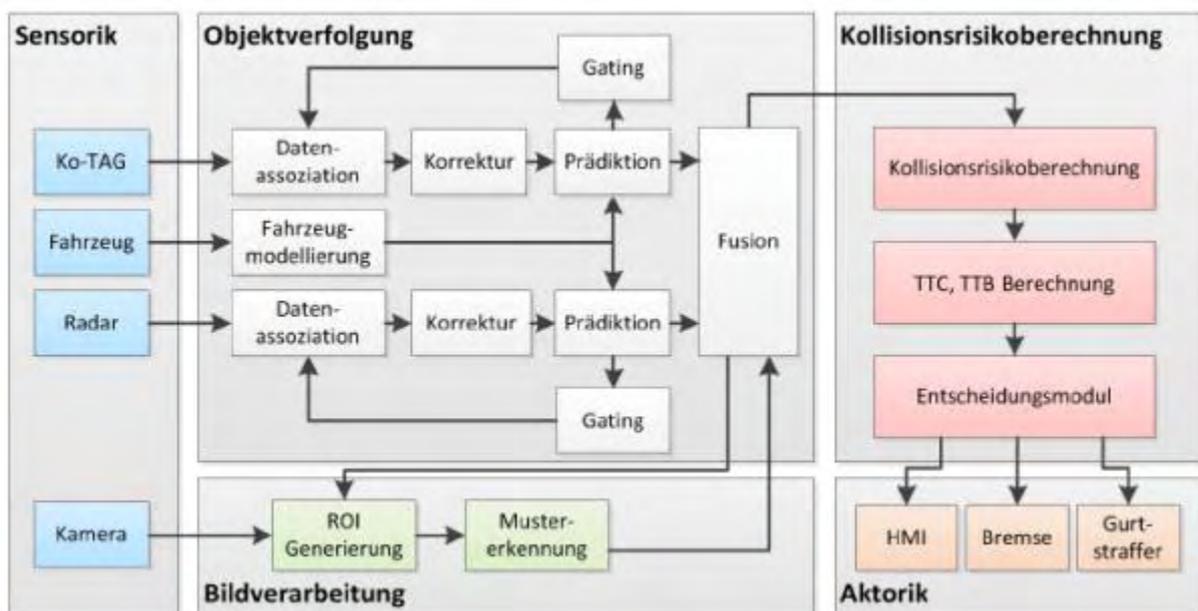


Abbildung 98: Systemarchitektur des vorausschauenden Fußgängerschutzsystems

Alle Algorithmus-Module sind umfassend in dem [Ko-TAG Abschlußbericht CSEI] beschrieben.

Besonderer Forschungsaufwand wurde in die Entwicklung eines Kollisionsrisikomodells gesetzt, das unter Berücksichtigung der Bewegungsfähigkeiten der Verkehrspartner ein gut belastbares Kollisionsrisiko ermittelt. Zur Ermittlung des Kollisionsrisikos wird dazu der Bewegungszustand der betroffenen Verkehrspartner extrapoliert. Für die Berechnung des Kollisionsrisikos

sionsrisikos im relevanten Zeitraum vor einem Unfall wurden verschiedene Modellansätze entwickelt. Im folgenden sind 2 Varianten erläutert:

### Area Pedestrian Car (APC)

Das APC-Verfahren ist ein Ansatz zur Kollisionsrisikoabschätzung, der von der Continental Safety Engineering International GmbH entwickelt wurde. Der Algorithmus ermittelt den sogenannten Jaccard-Koeffizienten, der eine Kennzahl für die Ähnlichkeit von Mengen darstellt. Es wird berechnet mit welchem Anteil die Bewegungsfläche des Fußgängers den Fahrschlauch des Fahrzeugs schneidet und dies in Relation zur gesamten Bewegungsfläche gestellt. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Funktionsprinzip des APC-Modells.

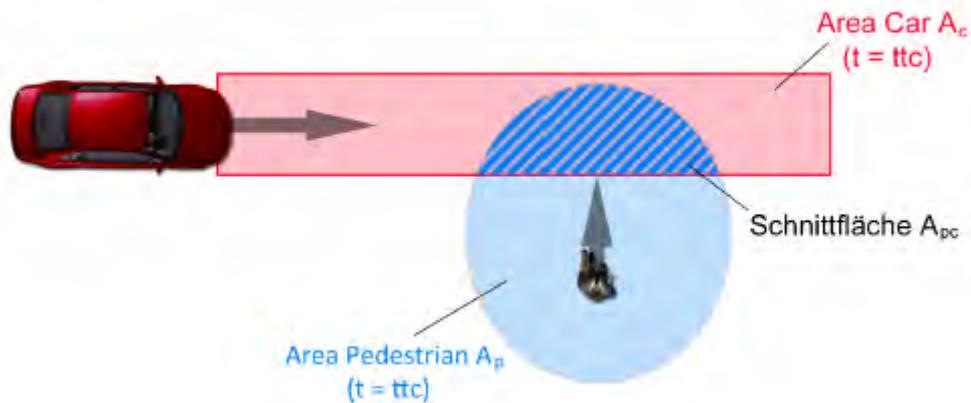


Abbildung 99: Funktionsprinzip des APC-Modells

Das Risikokriterium APC berechnet sich wie folgt:

$$APC = \frac{A_p \cap A_c}{A_p}$$

Dabei werden keine zeitdiskreten Zustände, sondern immer die komplette relevante Zeitspanne betrachtet, die entweder durch den maximalen Zeitraum von zwei Sekunden oder durch die aktuelle Zeit bis zur Kollision (time to collision - TTC) begrenzt wird. Daher wird die Hüllkurve des maximalen Bewegungsspielraums des Fußgängers mit kleiner werdender TTC ebenfalls kleiner.

Die Bewegungsfläche des Fußgängers wird durch ein Polygon mit einer variablen Anzahl an Einzelpunkten beschrieben und bei der Berechnung des Kollisionsrisikos an die Fußgängerposition verschoben sowie entsprechend der Fußgängerorientierung transformiert. Das Fahrschlauchpolygon wird in jedem Zyklus basierend auf den aktuellen Fahrdynamikparametern neu ermittelt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Bewegungsflächen für unterschiedliche Laufgeschwindigkeiten und einer TTC von einer Sekunde.

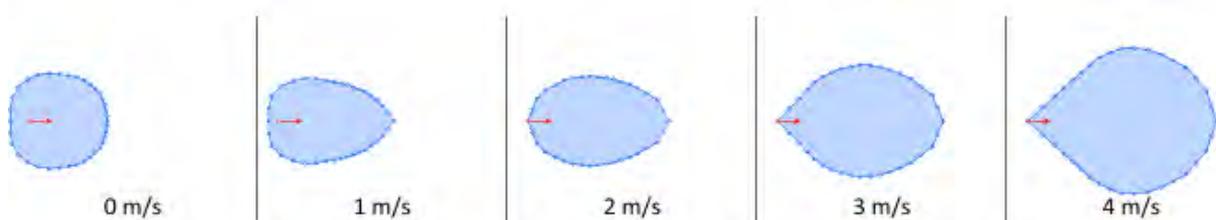
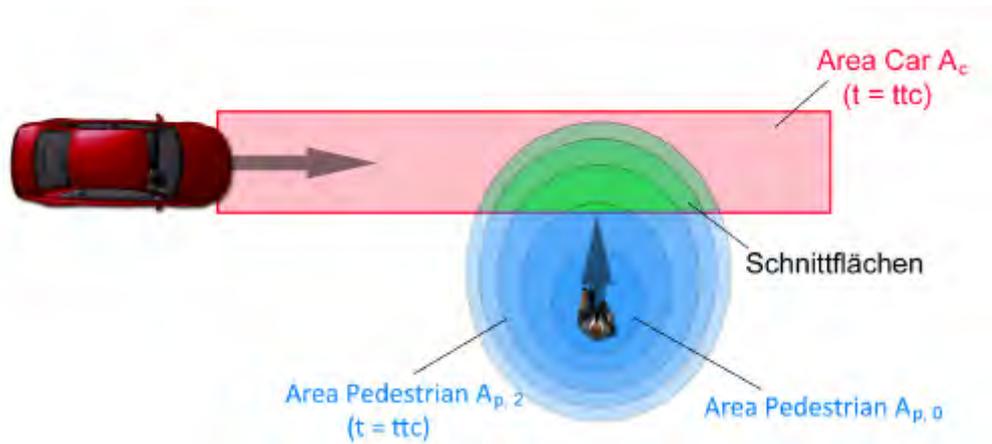


Abbildung 100: Bewegungsflächen bei unterschiedlichen Laufgeschwindigkeiten für eine Zeit von einer Sekunde

### Weighted Area Pedestrian Car (WAPC)

Das flächenbasierte APC-Verfahren ermöglicht eine indirekte Gewichtung.

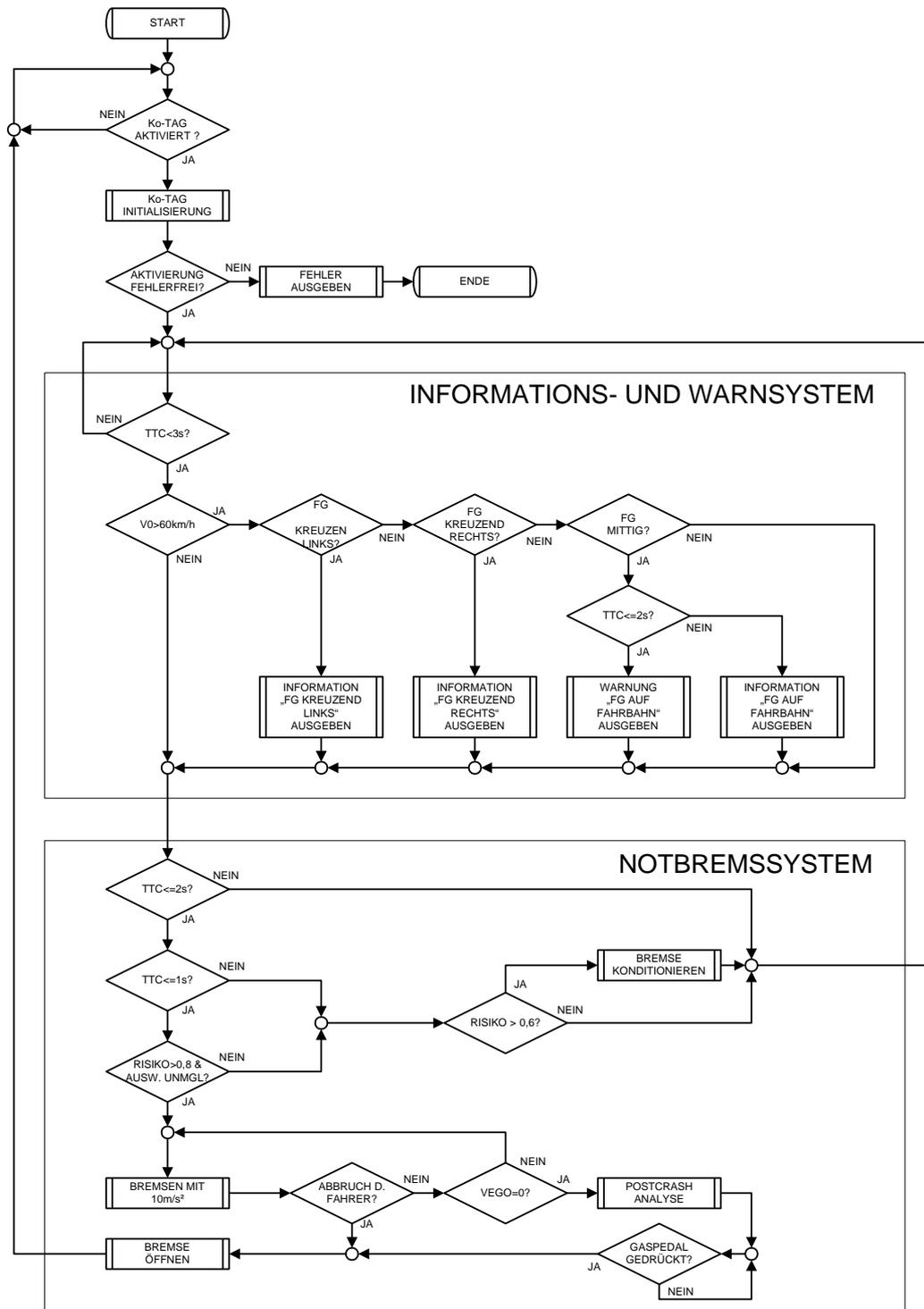
Anstatt eine einzelne Fläche mit dem Fahrschlauchpolygon zu schneiden, werden mehrere Bewegungsflächen verwendet, die sich durch die stufenweise ansteigende Ausnutzung des Bewegungsvermögens ergeben. Die Beweglichkeit des Fußgängers wird dabei in 10% Schritten von 0% bis 100% des maximalen Bewegungsvermögens gemäß des physiologischen Modells gesteigert. Dieser Ansatz wird als Weighted APC (WAPC) bezeichnet. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Funktionsprinzip des WAPC-Verfahrens:



**Abbildung 101: Funktionsprinzip des WAPC-Modells**

### 2.6.3.3 Schutzmaßnahmen

Abbildung 102 zeigt den Auslösealgorithmus des Ko-TAG Fußgänger-Schutzsystems als Flussdiagramm. Das System ist nach dem Start zunächst inaktiv und muss durch Drücken eines Aktivierungstasters in den aktiven Zustand gebracht werden. Nach der erfolgreichen Initialisierung, welche einen Selbsttest des Systems einschließt, ist das Ko-TAG System einsatzbereit.

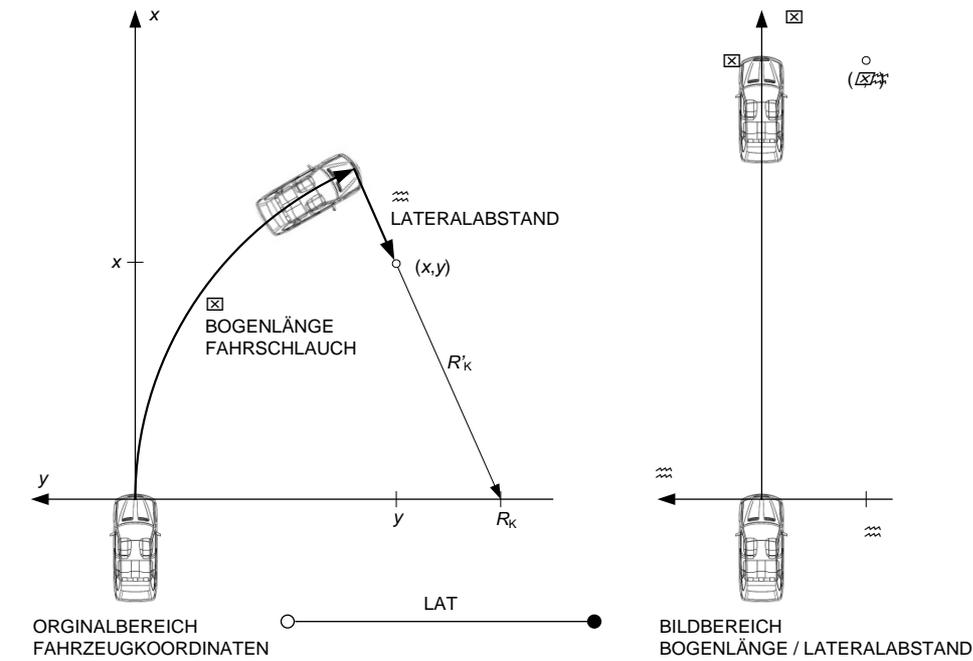


**Abbildung 102: Flussdiagramm des Ko-TAG Schutzsystems**

In der Hauptschleife, die alle 20ms durchlaufen wird, erfolgt zunächst eine Bestimmung der Kollisionszeiten für jeden detektierten Ko-TAG Transponder.

### Warnsystem für den Fußgängerschutz

Zur Definition der nimmt Bezug auf die momentane Fahrzeugtrajektorie und wird in Lateralkoordinaten definiert. Eine Information beziehungsweise Warnung des Fahrers erfolgt anschließend, wenn sich ein Fußgänger in definierten Warnbereichen vor dem Fahrzeug befindet.



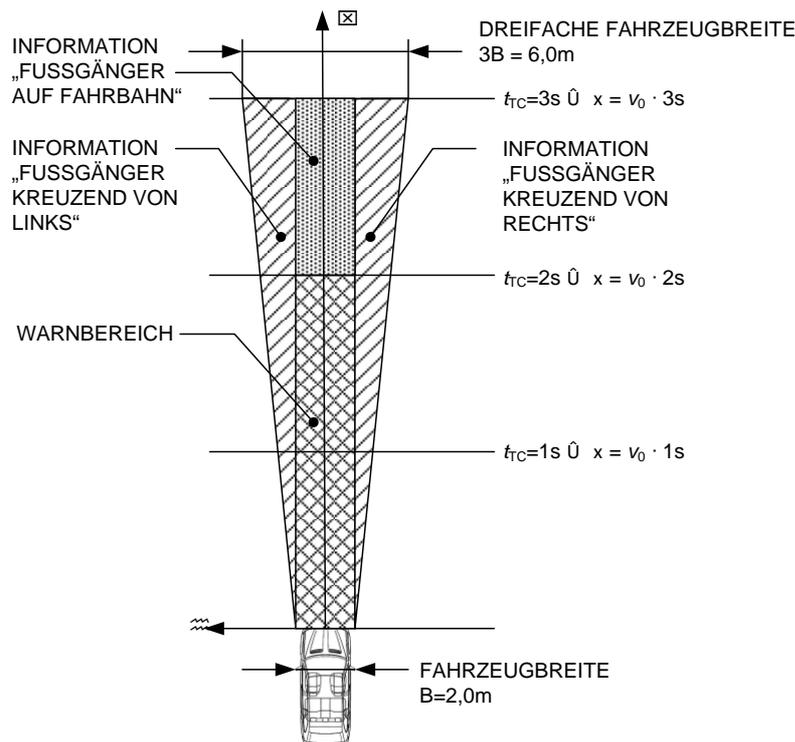
**Abbildung 103: Lateraltransformation**



**Abbildung 104: Warnsymbole für Fahrerinformation "Fußgänger kreuzend von links", "Fußgänger kreuzend von rechts" und "Fußgänger auf der Fahrbahn"**

Es wird bei der Information generell zwischen drei möglichen Zuständen unterschieden:

- Fußgänger kreuzend von links.
- Fußgänger auf der Fahrbahn.
- Fußgänger kreuzend von rechts.

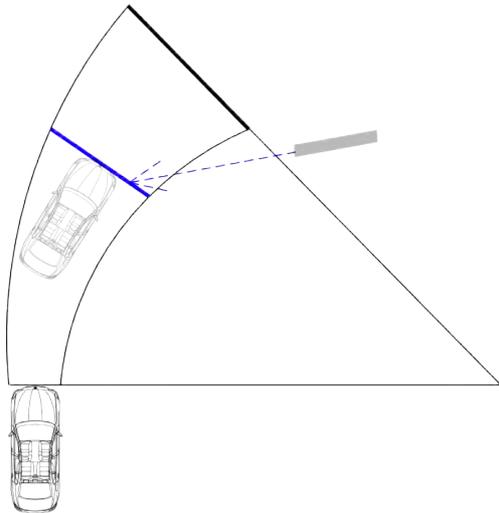


**Abbildung 105: Definition der Informations- und Warnbereiche im Lateralkoordinatensystem**

### Warnsystem für den Radfahrerschutz

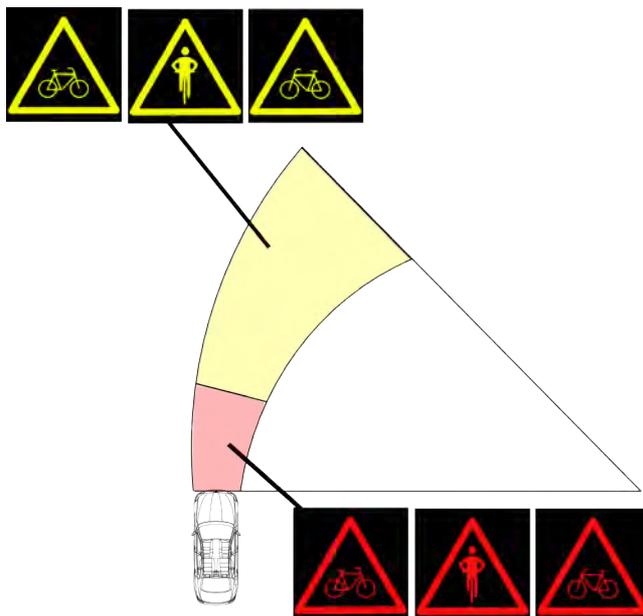
Aufgrund der höheren Geschwindigkeiten, die Radfahrer im Vergleich zu Fußgängern erreichen, reicht für die bereits eingeführte Warnstrategie mit einer Einteilung des Bereichs vor dem Fahrzeug in Flächen für eine Symbolauswahl nicht mehr aus. Zusätzlich kann ein Radfahrer die Fahrtrichtung nur in bestimmten Grenzen verändern und nicht wie ein Fußgänger z.B. auf der Stelle umkehren. Für Radfahrer darf bei der Warnlogik daher nicht der Aufenthaltsort zum Erfassungszeitpunkt ausschlaggebend sein, sondern es muss der Kollisionskurs mit dem Fahrzeug erkannt werden. Ausschlaggebend ist dann, ob sich der Ort, an dem ein Zusammenstoß erwartet wird, innerhalb des Warnbereichs befindet.

Für die verwendete Warnstrategie ist besonders der Bewegungsvektor des Fahrrads relativ zum Fahrzeug relevant. Zur Ermittlung des Kollisionsortes werden in der Warnfunktion Radfahrer und Fahrzeug anhand ihrer aktuellen Bewegungsrichtung stückweise präzisiert. Sofern es einen Zeitpunkt innerhalb des Warnhorizonts gibt, zu dem Radfahrer und Fahrzeug auf gleicher Höhe sind und sich der Radfahrer innerhalb des Warnbereichs befindet, wird eine gelbe oder rote Informations- bzw. Warnungsmeldung an den Fahrer ausgegeben.



**Abbildung 106: Durch Prädiktion der Radfahrerbewegung wird bestimmt, ob sich das Fahrrad im erweiterten Warnbereich befinden wird, wenn es sich auf gleicher Höhe mit dem Fahrzeug befindet**

Wie in Abbildung 108 dargestellt, wird zwischen einer Information und einer akuten Warnung, die von einem Warnton begleitet wird unterschieden.



**Abbildung 107: Aufteilung der prädizierten Radfahrerpositionen in den Informationsbereich (gelb) und den Warnbereich (rot)**

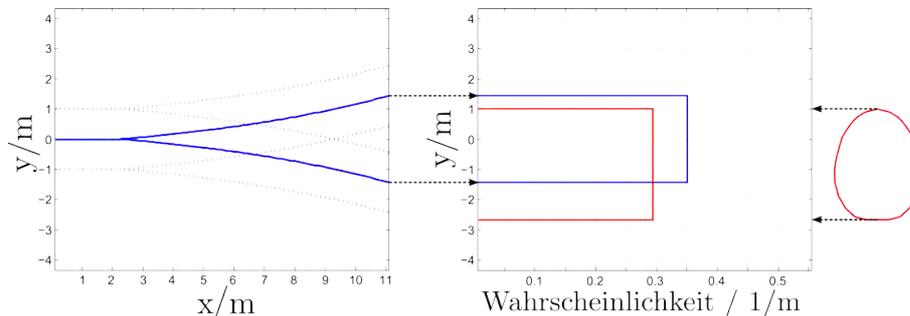
Um dem Fahrer anzeigen zu können, ob eine Kollision mit einem Fahrradfahrer im Längs- oder im Querverkehr droht, wird der Winkel des Bewegungsvektors analysiert und ein Symbol ausgewählt.

### **Auslösung Notbremssystem für Fußgänger und Radfahrerschutz**

Die Auslösung des Notbremssystem beruht auf einer Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung. Dazu werden die entwickelten Umfeldmodelle für PKWs, Fußgänger und Radfahrer genutzt, um realistische Kollisionswahrscheinlichkeiten zu berechnen. Aus empirischen Versuchen werden Schwellwerte für diese Wahrscheinlichkeiten bestimmt, die als Auslösekrite-

rium für eine Konditionierung der Bremsanlage oder für eine Auslösung einer autonomen Notbremsung herangezogen werden.

### Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung

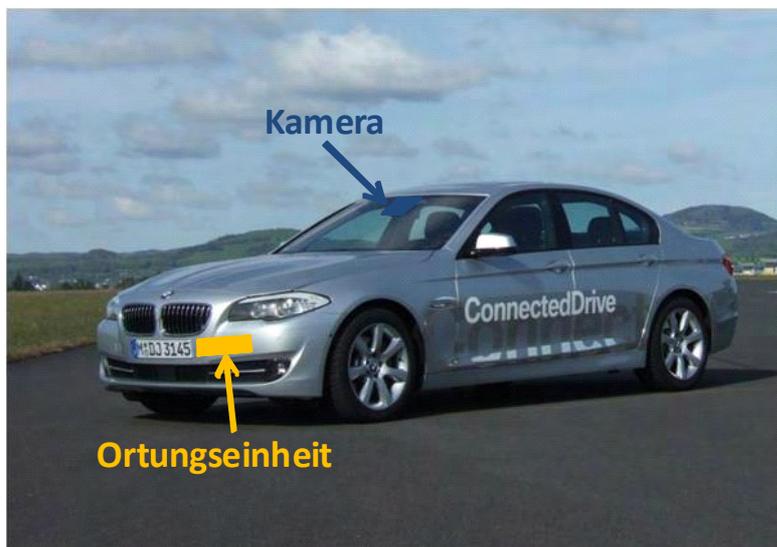


**Abbildung 108:** Zur Bestimmung der Kollisionswahrscheinlichkeit werden mögliche Aufenthaltsbereiche der Verkehrsteilnehmer berechnet

Nach Auslösung der Notbremsung wird ständig auf einen Abbruch des Bremsmanövers durch den Fahrer geprüft, welcher die Bremsung jederzeit durch aktives Betätigen des Gaspedals oder ein Lenkmanöver beenden kann. Die Bremsung endet nicht, wenn das Fahrzeug die Eigengeschwindigkeit 0 km/h erreicht, also zum Stehen gekommen ist. Dies soll verhindern, dass das Fahrzeug nach der Notbremsung wieder autonom anrollt. Die Bremse wird erst wieder gelöst, wenn der Fahrer durch erneutes Drücken des Ko-TAG-Aktivierungstasters oder des Gaspedals die Notbremsphase beendet.

#### 2.6.3.4 Aufbau Demofahrzeug VRU Schutz

Bei dem ausgerüsteten Versuchsfahrzeug handelt es sich um ein Fahrzeug des Typs BMW F10 (528i).



**Abbildung 109:** Versuchsfahrzeug BMW F10 (528i) mit Einbaupositionen von Ortungseinheit und Kamera

Das Fahrzeug wurde mit zusätzlichen Displays und Sensoren insbesondere der Ortungseinheit, einer Videokamera, einer Bildverarbeitungseinheit und einem Referenzsystem ausgestattet. Ebenfalls wurde eine CCU vorgesehen um einen Austausch mit der Ko-PER Fahrzeugflotte zu ermöglichen.

Die Architektur des Fahrzeugs wurde in Anlehnung an die Systemspezifikation umgesetzt.

### 2.6.3.5 Aufbau Demofahrzeug für VRU Schutz und RUS

Für die Erprobung der Applikationen Fußgängerschutz und Rundumsicherheit wurde von CSEI ein Versuchsträger für die frühe Machbarkeitsphase und ein weiterer Versuchsträger für die eigentlichen Forschungsphasen aufgebaut und sukzessive angepasst. In den nachfolgenden Abbildungen sind die beiden Versuchsträger abgebildet:

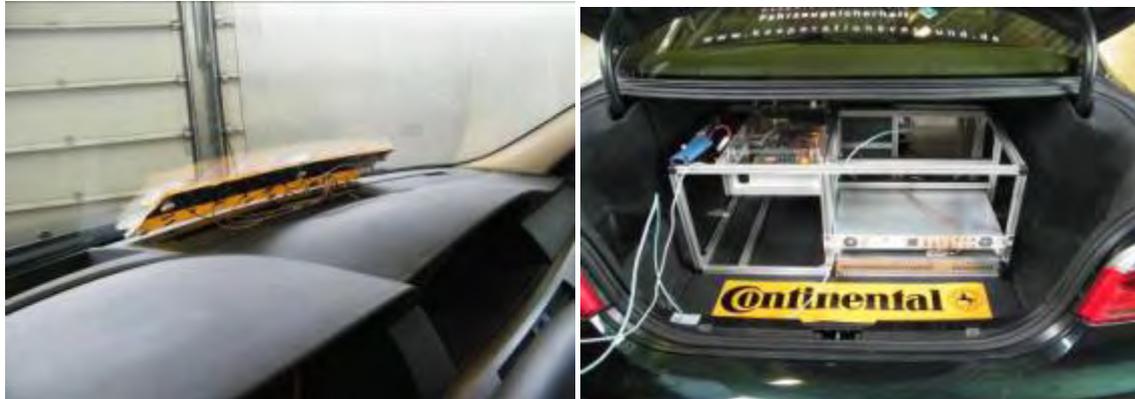


Abbildung 110: Erprobungsträger in der Machbarkeitsphase zu Projektbeginn

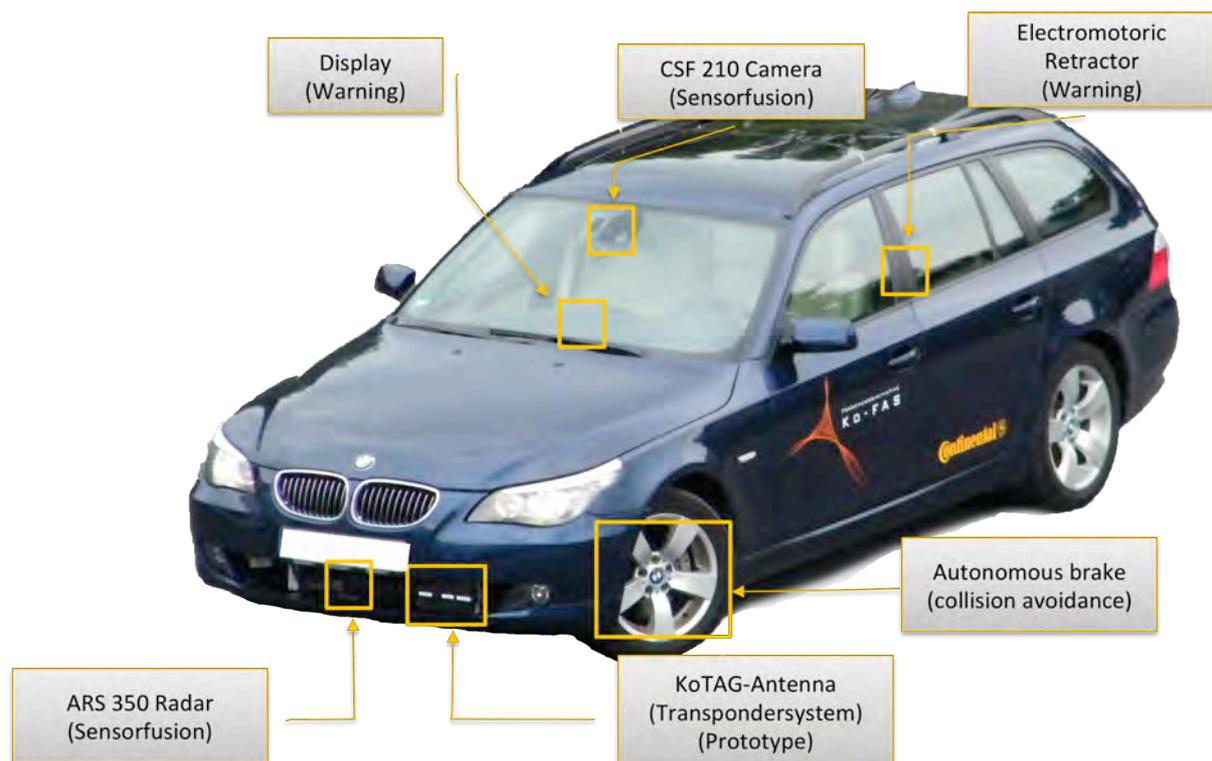


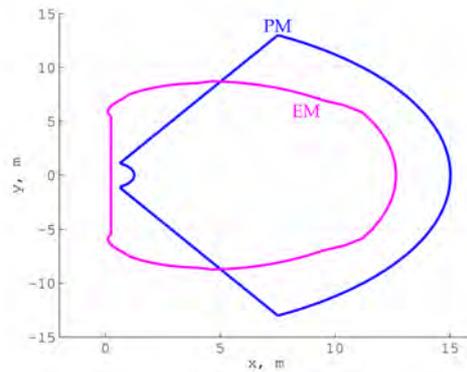
Abbildung 111: Finaler Erprobungsträger mit Ko-TAG 2.0 Technologie

### 2.6.3.6 Schutz von Radfahrern

Zur Umsetzung eines Radfahrerschutzesystems ist es insbesondere erforderlich eine geeignete Beschreibung des Bewegungsverhaltens dieses Objekttyps zu entwickeln und diese geeignet mit der Kollisionsrisikobestimmung zu verknüpfen.

Für die Modellierung des maximal möglichen Handlungsspielraums eines Radfahrers wurde das empirisch ermittelte Bewegungsmodell von CSEI verwendet. Dieses beschreibt in Abhängigkeit vom aktuellen Bewegungszustand und der noch zur Verfügung stehenden Zeit, den geometrischen Bereich, in dem sich der Radfahrer aufhalten kann. Dieser Bereich ist

begrenzt durch die maximal möglichen Lenk-, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, die durchgeführt werden können, ohne dass es zum Sturz des Radfahrers kommt. Abbildung 112 veranschaulicht die Bewegungsmöglichkeiten eines Radfahrers nach dem Bewegungsmodell von CSEI (EM) im Vergleich mit einem Punktmodell (PM). Beim Punktmodell wird davon ausgegangen, dass der Radfahrer eine bestimmte Beschleunigung in alle Richtungen aufbringen kann. Die Unterschiede zwischen den beiden Modellen verdeutlichen, dass eine physikalische Punktmodellierung signifikante Abweichungen vom tatsächlichen Verhalten eines Radfahrers aufweist.

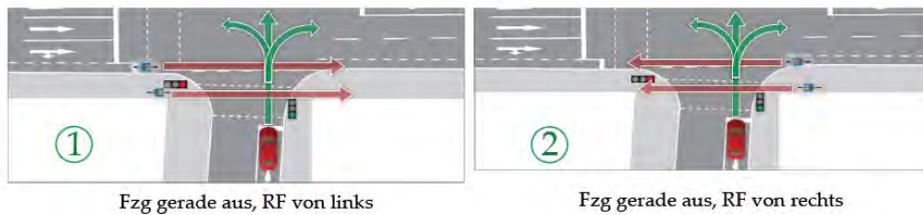


**Abbildung 112: Möglicher Bewegungsspielraum für einen Radfahrer, der sich am Ort (0,0) befindet und sich in positiver x-Richtung bewegt, Vergleich zwischen dem empirischen Modell (EM) und dem Punktmodell (PM)**

#### **Evaluierung in beispielhaften Szenarien**

Der beschriebene Algorithmus zur Kollisionswahrscheinlichkeitsberechnung wurde in folgenden typischen Unfallszenarien getestet. Dabei werden 3 Haupttypen betrachtet: Kreuzungsunfall, Abbiegeunfall und Längsverkehrsunfall.

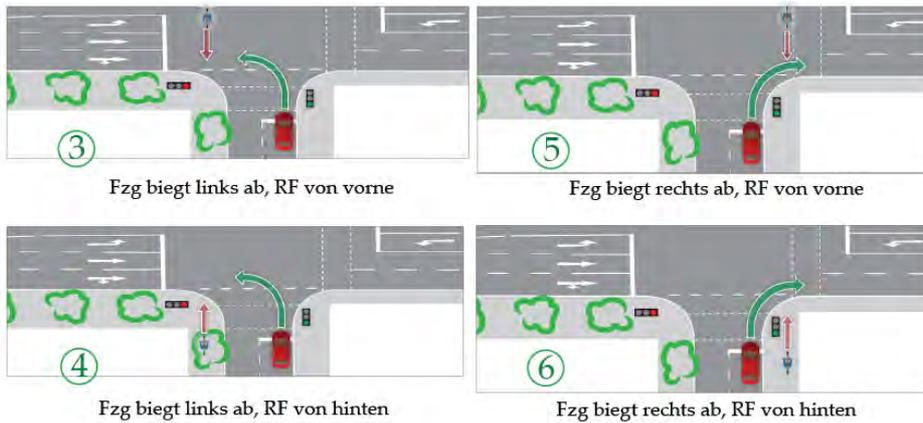
### Kreuzungsunfall



Fzg gerade aus, RF von links

Fzg gerade aus, RF von rechts

### Abbiegesunfall



Fzg biegt links ab, RF von vorne

Fzg biegt rechts ab, RF von vorne

Fzg biegt links ab, RF von hinten

Fzg biegt rechts ab, RF von hinten

### Längsverkehrsunfall



Fzg gerade aus, RF voraus

**Abbildung 113: Übersicht der getesteten Radfahrerszenarien**

Abbildung 113 zeigt die ermittelten Radfahrer-Testszenarien. Die Kreuzungsunfälle unterscheiden sich auf Basis der Radfahrerposition und -orientierung zum Fahrzeug von den anderen Szenarien: Der Radfahrer kommt entweder von links oder von rechts. In der Regel bewegt sich der Radfahrer senkrecht zum Fahrzeug. Die Abbiegeunfälle unterscheiden sich aufgrund der Abbiegebewegung des Fahrzeugs (Rechts oder Linksabbiegen) von den anderen Szenarien: Der Radfahrer kommt entweder von vorne oder von hinten. Die Radfahrertrajektorie schneidet das Fahrzeug in einem Winkel, der nicht zwingend 90 Grad beträgt. Die Längsverkehrsunfälle unterscheiden sich auf Basis der RF-Bewegung vor der Kollision: Dabei fährt der Radfahrer entweder gerade aus oder biegt links ab.

### Testplan

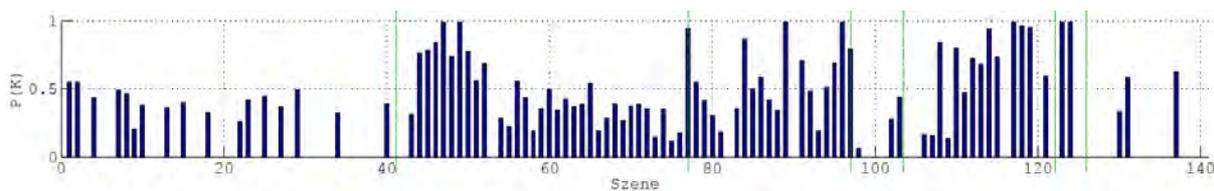
Anhand der Szenarienliste wurde ein Messplan ausgearbeitet, der in Summe 140 Sequenzen vorsieht. Dabei wurden in die 7 definierten Szenarien nachgestellt und jeweils die Geschwindigkeit von Fahrzeug und Radfahrer variiert, um eine möglichst gute Abbildung des realen Unfallgeschehens zu erhalten.

Beschreibung	V_ego	20 km/h			30 km/h			50 km/h			Summe	
	V_RF	10 km/h	15 km/h	20 km/h	10 km/h	15 km/h	20 km/h	10 km/h	15 km/h	20 km/h		
Fzg gerade aus , RF von links	Kreuzung	4	23	11	1	2	0	1	0	0	42	77
Fzg gerade aus, RF von rechts		14	10	5	2	2	0	2	0	0	35	
Fzg biegt links ab, RF von vorne	Abbiege	2	4	2	2	10	0	0	0	0	20	50
Fzg biegt links ab , RF von hinten		0	2	0	0	5	0	0	0	0	7	
Fzg biegt rechts ab, RF von vorne		2	7	2	0	8	0	0	0	0	19	
Fzg biegt rechts ab, RF von hinten		2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	
Fzg gerade aus, RF voraus	Längs	2	2	0	0	6	0	0	3	0	13	13
Summe		26	50	20	5	33	0	3	3	0	140	

**Abbildung 114: Testplan mit 140 aufgezeichneten Szenarien**

### Ergebnisse Radfahrererkollisionsalgorithmus

Auf die aufgezeichneten Szenarien wurde der Kollisionswahrscheinlichkeitsalgorithmus angewendet und evaluiert, welche Kollisionswahrscheinlichkeiten bei diesen kritischen Beinahe-Kollisionen auftreten. Auf Basis dieser Werte konnte eine Schwelle für die Kollisionswahrscheinlichkeit und damit ein Auslösekriterium bestimmt werden. Sehr knappe Kollisions-szenarien wiesen hierbei eine Kollisionswahrscheinlichkeit nahe 100% auf. Alle weiteren Szenarien lagen dabei deutlich unterhalb von 75%.



**Abbildung 115: Aufgetretene maximale Kollisionswahrscheinlichkeiten in den 140 getesteten Szenarien**

Aufgrund der Testmessung wird der Schwellwert für die Auslösung einer autonomen Notbremsung auf Basis des entwickelten Algorithmus auf 75% gelegt. Dieses Auslösekriterium ermöglicht einen Auslösezeitpunkt, der früh genug liegt, um Wirksamkeit bei der Reduktion der Unfallschwere durch Geschwindigkeitsabbau zu liefern, aber gleichzeitig in den getesteten Szenarien zu keiner Falschauslösung führt.

## 2.6.4 System Rundumsicherheit

### 2.6.4.1 Sicherheitsgewinn durch Ortung verdeckter Objekte

Die Besonderheit des Ko-TAG Ortungssystems gegenüber anderen Sensoriken wie Radar- oder Kamerasystemen, liegt in seiner Eigenschaft, optisch verdeckte Objekte (Safe-TAGs) = Ko-TAG Fußgänger- bzw. Fahrzeug-Transponder) mit Abstand und Winkel orten und auch klassifizieren (Fußgänger, Radfahrer, Pkw, Motorrad, Lkw, ...) zu können. Dadurch können drohende Gefahren früher erkannt werden als bei Radar- oder Kamerasystemen, für die „Sichtkontakt“ (Line of Sight, LoS) eine unabdingbare Voraussetzung für die Detektion eines Objektes ist. Das Orten optisch verdeckter Objekte ermöglicht ein früheres Eingreifen in die Fahrzeugdynamik (und im besten Fall die Vermeidung einer Kollision) als mit jedem anderen heute bekanntem (autonomen) Sensorsystem.

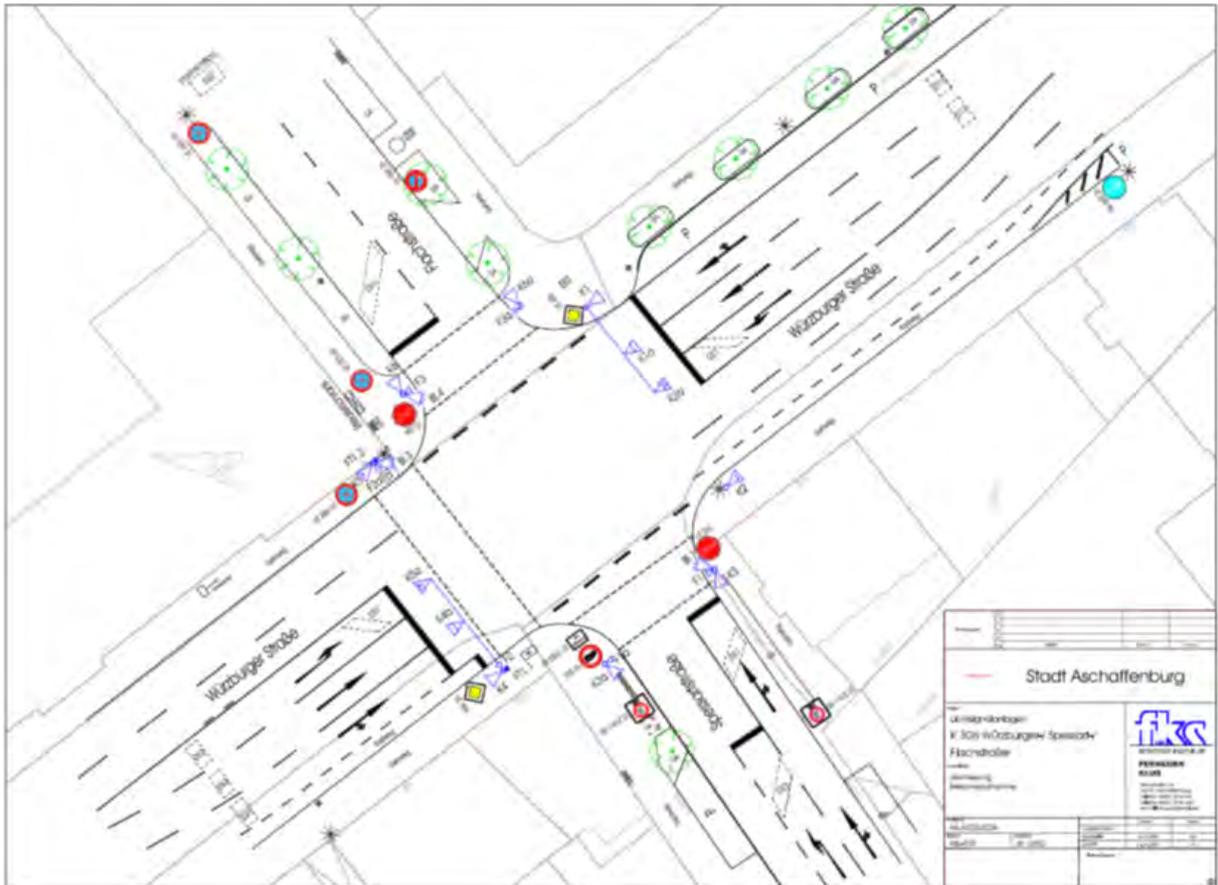
Den zeitlichen Vorteil einer verdeckten Ortung gegenüber einer reinen LOS-Ortung wurde anhand einer realen Kreuzung im innerstädtischen Bereich untersucht. Hierzu wurden umfangreiche Untersuchungen und Modellrechnungen auf Basis der Geometrie der „Aschaffener Kreuzung“, einer speziell für Ko-FAS ausgerüsteten Kreuzung am Campus der Hochschule Aschaffenburg, durchgeführt. Diese Kreuzung spielte vor allem für das Ko-FAS – Verbundprojekt Ko-PER eine große Rolle und diente dort als Referenzkreuzung.

Das folgende Bild zeigt eine Luftaufnahme dieser öffentlichen Kreuzung in Aschaffenburg.



**Abbildung 116: (Ko-PER) Referenzkreuzung am Campus der Hochschule Aschaffenburg**

In der nächsten Abbildung ist der Grundriss bzw. der Lage- / Vermessungsplan dieser Kreuzung ersichtlich.

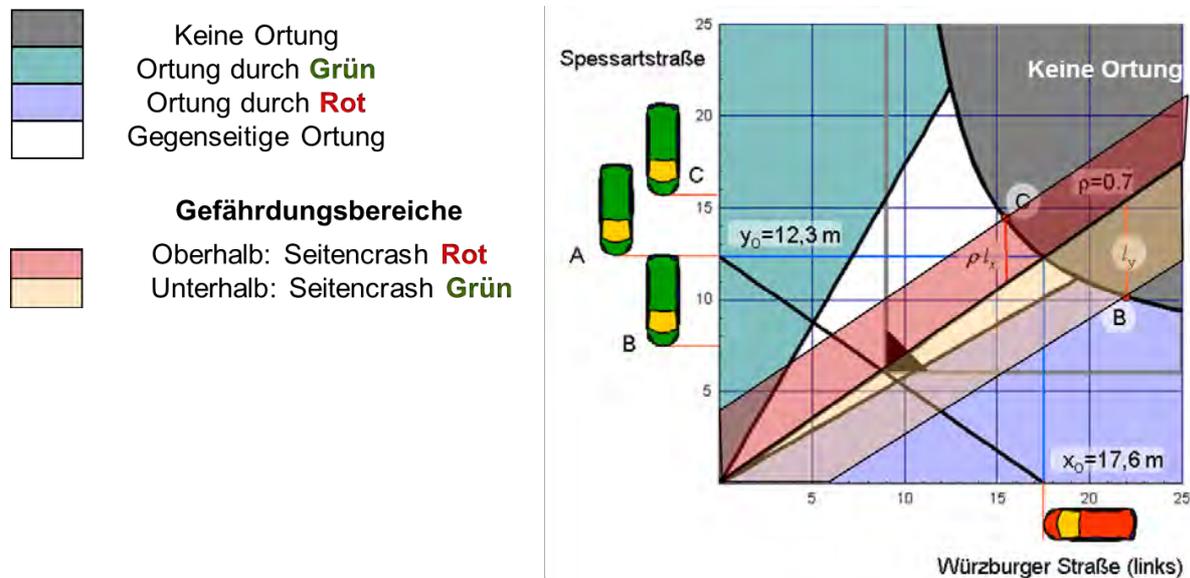


**Abbildung 117: Grundriss (Lage- / Vermessungsplan) der (Ko-PER) Referenzkreuzung**

Die Untersuchungen betrachteten die Sichtverdeckung an Gebäudeecken am Beispiel der Aschaffener Kreuzung. An der Kreuzung Würzburger Straße / Spessartstraße steht ein sichtverdeckendes Gebäude an denen die Fahrzeuge entlangfahren. Die Betrachtungen gingen von zwei Fahrzeugen aus, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aufeinander zufahren. Ein Fahrzeug nähert sich der Kreuzung mit einer fiktiven Geschwindigkeit von 42 km/h über die Spessartstraße, ein zweites Fahrzeug mit 60 km/h über die Würzburger Straße.

Die Geometrien der Kreuzung lassen sich auf ein normiertes Koordinatensystem übertragen (siehe folgende Abbildung), wobei jede Achse des Koordinatensystems einer der beiden Straßen entspricht.

Die beiden Fahrzeuge (grün und rot) fahren, entgegen der Darstellung, exakt entlang den Achsen auf den Ursprung des Koordinatensystems zu (das grüne Fahrzeug fährt entlang der y-Achse, das rote Auto entlang der x-Achse). A, B und C repräsentieren drei mögliche Positionen des grünen Fahrzeugs auf der Spessartstraße, die bei den Betrachtungen untersucht wurden. Die Gebäudeecke ist durch das schwarze Dreieck gekennzeichnet. Die tangierende schwarze Gerade an der „Gebäudeecke“ kennzeichnet die LoS zwischen den beiden Fahrzeugen, wenn sich das grüne Fahrzeug an der Position „A“ befindet.

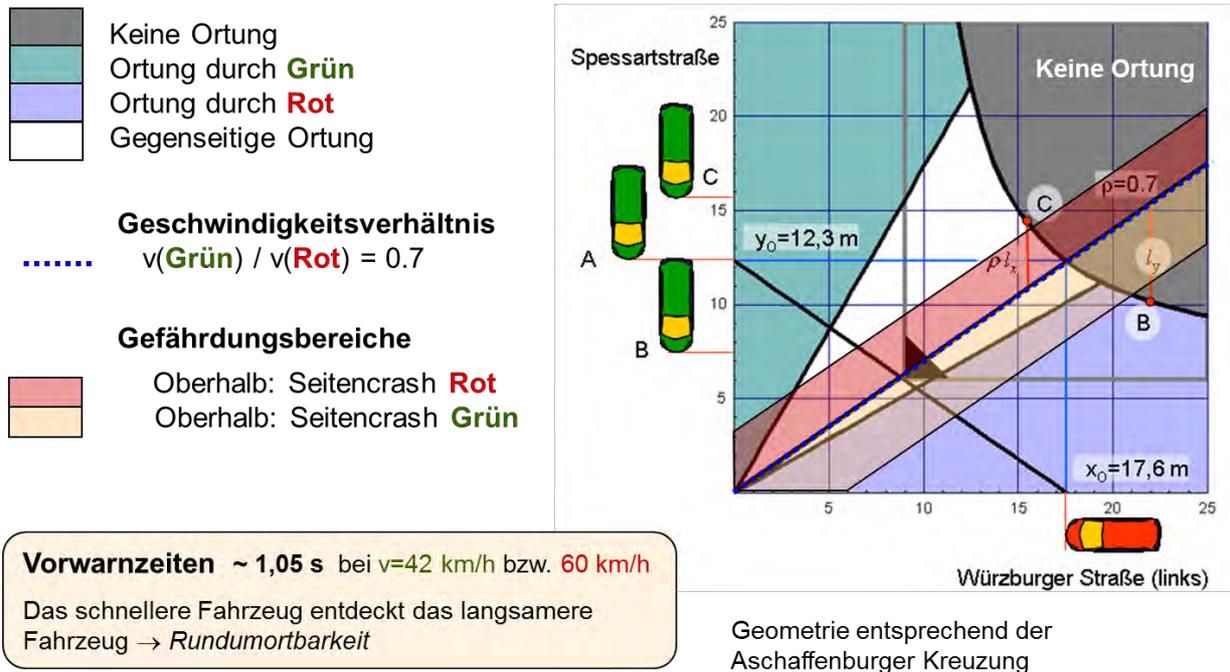


**Abbildung 118: Sichtverdeckung an Gebäudeecken**

Jeder Punkt der Ebene kennzeichnet mögliche Fahrzeugpositionen entlang den Achsen. Die Fahrzeuge können sich nicht sehen, falls der zugehörige Punkt in den grauen Bereich fällt, der durch eine Hyperbel begrenzt ist.

Je nach Fahrzeugposition und abhängig vom Antennenöffnungswinkel (Erfassungsbereich der Ortungseinheit) sieht entweder nur das grüne Fahrzeug das rote Fahrzeug oder umgekehrt. Wenn der Antennenöffnungswinkel über 45 Grad liegt, gibt es auch einen Bereich (weiß), in dem sich die Fahrzeuge gegenseitig erkennen können. Die Gefährdungsbereiche (=drohende Kollision) liegen oberhalb bzw. unterhalb dieser Geraden (in der Grafik durch die roten Senkrechten  $l_x$  und  $l_y$  bezeichnet) und berücksichtigen die Ausdehnung der beiden Fahrzeuge (Länge, Breite).

Die blaue gestrichelte Linie in der nächsten Abbildung ist eine Gerade deren Steigung dem Geschwindigkeitsverhältnis der beiden Fahrzeuge entspricht. Dieses Geschwindigkeitsverhältnis ist maßgeblich für die Beibehaltung eines Kollisionskurses. D.h. zwei Fahrzeuge die sich auf Kollisionskurs befinden, kollidieren mit einer Wahrscheinlichkeit von 100%, unabhängig von der berechneten Zeit bis zur Kollision (time to collision, ttc). Um den Kollisionskurs zu verlassen, sollte das stoßende Fahrzeug (Seitencrash beim anderen Fahrzeug) innerhalb der berechneten ttc so lange (stark) abbremsen, bis die relative Position der beiden Fahrzeuge außerhalb der gezeigten Gefährdungsbereiche liegt.



**Abbildung 119: LoS-Vorwarnzeiten in Verdeckungssituationen**

Aufgrund der Gebäudeecke und der relativ dichten Vorbeifahrt in 5 m bzw. 12 m ergibt sich der direkte Sichtkontakt bei einer Entfernung von 21,7 m entsprechend einer Vorwarnzeit von 1,05 s bei den betrachteten Geschwindigkeiten von 60 km/h auf der Hauptstraße (Würzburger Straße) und 42 km/h auf der Nebenstraße (Spessartstraße). Gemessen an der menschlichen Schrecksekunde, sind bei nur 1 Sekunde Vorwarnzeit Fahrerwarnungen schon im Grenzbereich und ein sofortiger Eingriff in die Fahrzeugdynamik (ohne Vorwarnung) könnte zur Vermeidung einer Kollision erforderlich sein.

Die angeführten Untersuchungen lieferten folgende Erkenntnisse:

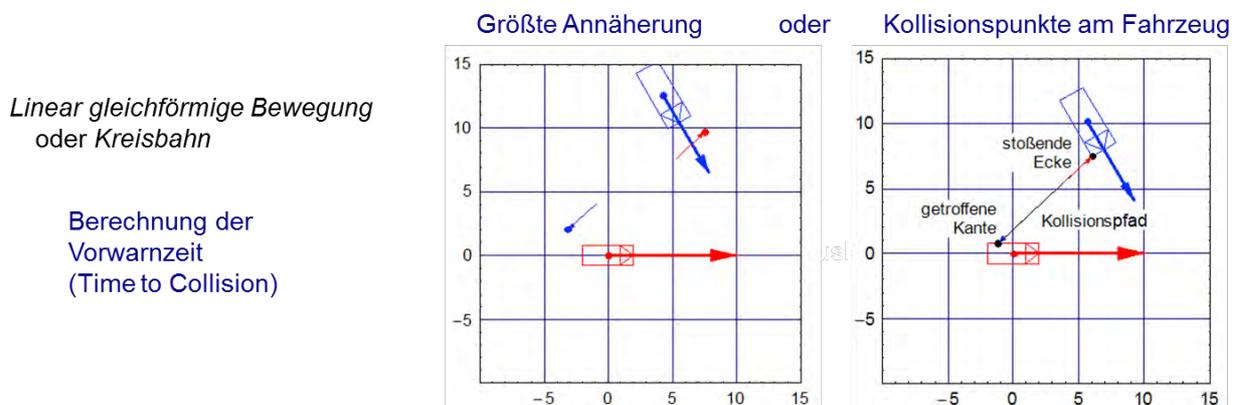
- Jede Zehntelsekunde, die ein Fahrzeug schon vor Sichtkontakt (also bei Verdeckung) geortet werden kann, kann für die Kollisionsvermeidung entscheidend sein.
- Es bedarf eines für die jeweilige Situation geeigneten Handlungskonzepts, um eine adäquate Systemreaktion auslösen zu können
- Die Strategie zur Kollisionsvermeidung muss zwischen den beteiligten Fahrzeugen koordiniert werden, damit der Kollisionspfad verlassen wird (Stichwort: Geschwindigkeitsverhältnis)
- Das schnellere Fahrzeug entdeckt das langsamere Fahrzeug zuerst und kann damit frühzeitig reagieren (z.B. Bremsengriff). Dies ist ein Nachweis, dass der Systemansatz der „Rundumortbarkeit“ den Anforderungen für RUS genügt.

## 2.6.4.2 Auslösealgorithmen

Basis für alle durch das Schutzsystem RUS zu treffenden Handlungen werden durch die Auslöseeinheit getroffen. Hier arbeiten die sogenannten Auslösealgorithmen, die zyklisch zu allen georteten Objekten deren Kollisionspfade und das Kollisionsrisiko berechnen.

Für linear gleichförmige Bewegung oder Bewegung auf Kreisbahnen werden die Punkte der größten Annäherung berechnet sowie die Kollisionspunkte am Fahrzeug. Kollisionspunkte sind diejenigen Punkte am Fahrzeug, die bei Beibehaltung des Bewegungszustandes (Gerade oder Kreisbahn) mit dem anderen Fahrzeug zuerst in Berührung treten. Hierbei unterscheidet man zwischen „stoßender Ecke“ und „getroffener Kante“. Auch der genaue Ort, ob Front oder Heck, Links oder Rechts wird angegeben, sowie die Kollisionsrichtung, die sich aus der vektoriellen Differenzgeschwindigkeit ergibt.

Leider sind diese Berechnungen nur gültig, wenn die Fehler in den Bewegungsparametern klein sind. Der anfängliche Positionsfehler des Ko-TAG Systems überträgt sich direkt auf die Ungenauigkeit zum Kollisionszeitpunkt.



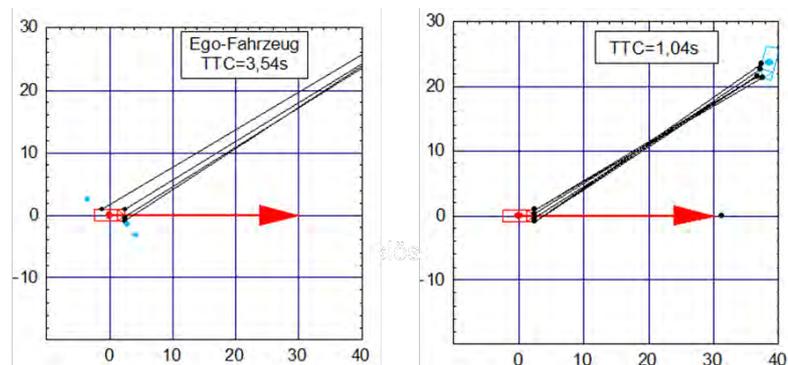
**Abbildung 120: Kollisionspfaderkennung**

Anfängliche Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfehler wachsen als Längsfehler mit der Zeit bis zur Kollision an. Anfängliche Richtungs- und Lenkwinkelfehler ergeben in erster Näherung Fehler quer zur Fahrzeurichtung und auch diese wachsen mit der Zeit.

In einer beispielhaften Fehlerberechnung wurde angenommen dass die Geschwindigkeit nur bis auf  $\pm 3$  m/s bekannt ist, die anderen Parameter aber korrekt sind.

### Beispiel:

Kollisionspunkte bei  
Variation der Geschwindigkeit  
( $\pm 3$  m/s)



**Abbildung 121: Kollisionspunktbestimmung bei Variation der Geschwindigkeit**

Zum Zeitpunkt 3,54 s vor der Kollision lässt sich noch nicht entscheiden, ob es bei unveränderter Bewegung zu einer Kollision kommt. Erst ca. 1. s vor dem Zusammenstoß ist klar, dass es wohl zu einem Crash von „vorn“ für das rote Fahrzeug kommt, wobei noch nicht klar ist, ob vorn links oder vorn rechts. Das blaue Fahrzeug könnte noch immer seitlich oder von

vorn getroffen werden oder mit seiner vorderen rechten Ecke die Vorderseite des roten Fahrzeugs treffen. Die Aufprallrichtung ist aber schon sehr stabil.

Fehler	längs	quer
Position	$\Delta x$	$\Delta y$
Geschwindigkeit	$\Delta v \cdot \tau$	
Beschleunigung	$\Delta a \cdot \tau^2 / 2$	
Richtung		$\Delta h_\phi \cdot \tau \cdot v$
norm. Lenkwinkel		$\Delta y \cdot (\tau \cdot v)^2 / 2$

Die Unterscheidung zwischen **Vorbeifahrt** und **drohender Kollision** erfordert eine **zuverlässige Fehlerberechnung**

**Abbildung 122: Fehlerrechnung bei der Kollisionspfadbestimmung**

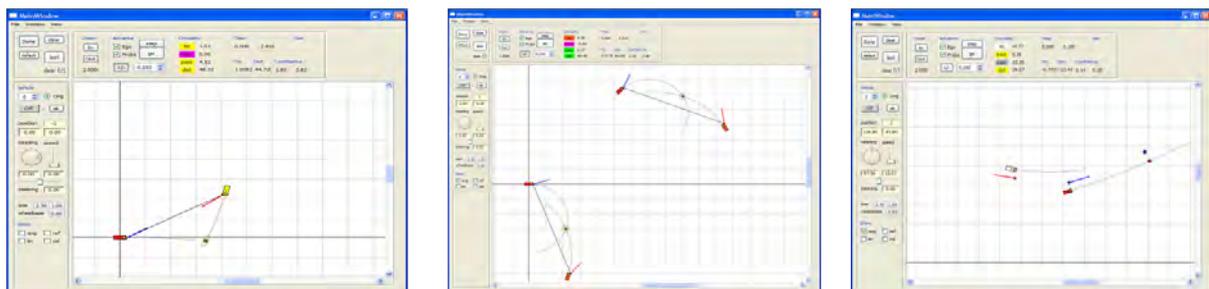
Eine Unterscheidung zwischen Vorbeifahrt und drohender Kollision erfordert damit eine zuverlässige Fehlerberechnung und ggf. eine Nachjustierung der entsprechenden Kollisionspunkte. Dies wird in Ko-Tag durch „wiederholte“ Ortungsvorgänge erreicht. Damit werden dann auch „beschleunigte“ Bewegungen erfasst und fließen bei der Berechnung der Kollisionspunkte mit ein.

Die Ergebnisse aus den beschriebenen Untersuchungen und Berechnungen waren die Basis für die entwickelten Auslösealgorithmen. Diese wurden in C/C++ - Code implementiert und zur Validierung in einem speziell hierfür geschriebenen Simulator unter Qt visualisiert.

Crossroads scenarios

Circular driving

Contrive



**Abbildung 123: Tool zur Entwicklung und Validierung der Auslösealgorithmen**

Als Gesamtergebnis der Untersuchungen wurde das Handlungskonzept definiert und der Algorithmus für das Auslösen der Warnkaskade bzw. Einleiten der Schutzmaßnahmen festgelegt.

Im RUS Algorithmus werden die Kollisionspunkte für jedes von Ko-Tag erkannte Fahrzeug berechnet. Durch eine Vorselektion werden diejenigen Fahrzeuge aussortiert, d.h. in der Priorität heruntersetzt, die entweder eine Vorbeifahrt in großer Entfernung ergeben oder bei der eine Kollision in absehbarer Zeit nicht möglich ist. Es gibt also eine Zeit- und eine Entfernungsschwellwert. Die kritischen Fahrzeuge werden mit höherer Priorität vom Ko-TAG System abgefragt und die Kollisionspunkte zyklisch neu berechnet.

Wenn die Kollisionspunkte hinreichend stabil sind wird die Warnkaskade getriggert, d.h. es können damit Warnungen an den Fahrer ausgelöst bzw. Schutzmaßnahmen eingeleitet werden, bis hin zum automatischen Bremsmanöver.

### 2.6.4.2.1 Handlungskonzept und Schutzmaßnahmen

Das im Schutzsystem für RUS implementierte Handlungskonzept basiert auf den Stufen „informieren – warnen – alarmieren – eingreifen“. Welche Stufe wann ausgelöst wird, hängt von der durch die Auslösealgorithmen berechneten Zeit bis zu einer drohenden Kollision (time-to-collision, ttc) und dem damit verbundenen Kollisionsrisiko ab.

#### Handlungskonzept (informieren, warnen, alarmieren, eingreifen)

Szenario: Zum Zeitpunkt  $t_0 - 5$  wird ein Kollisionsrisiko erkannt (berechnet), welches bis  $t_0$  andauert und zunimmt.

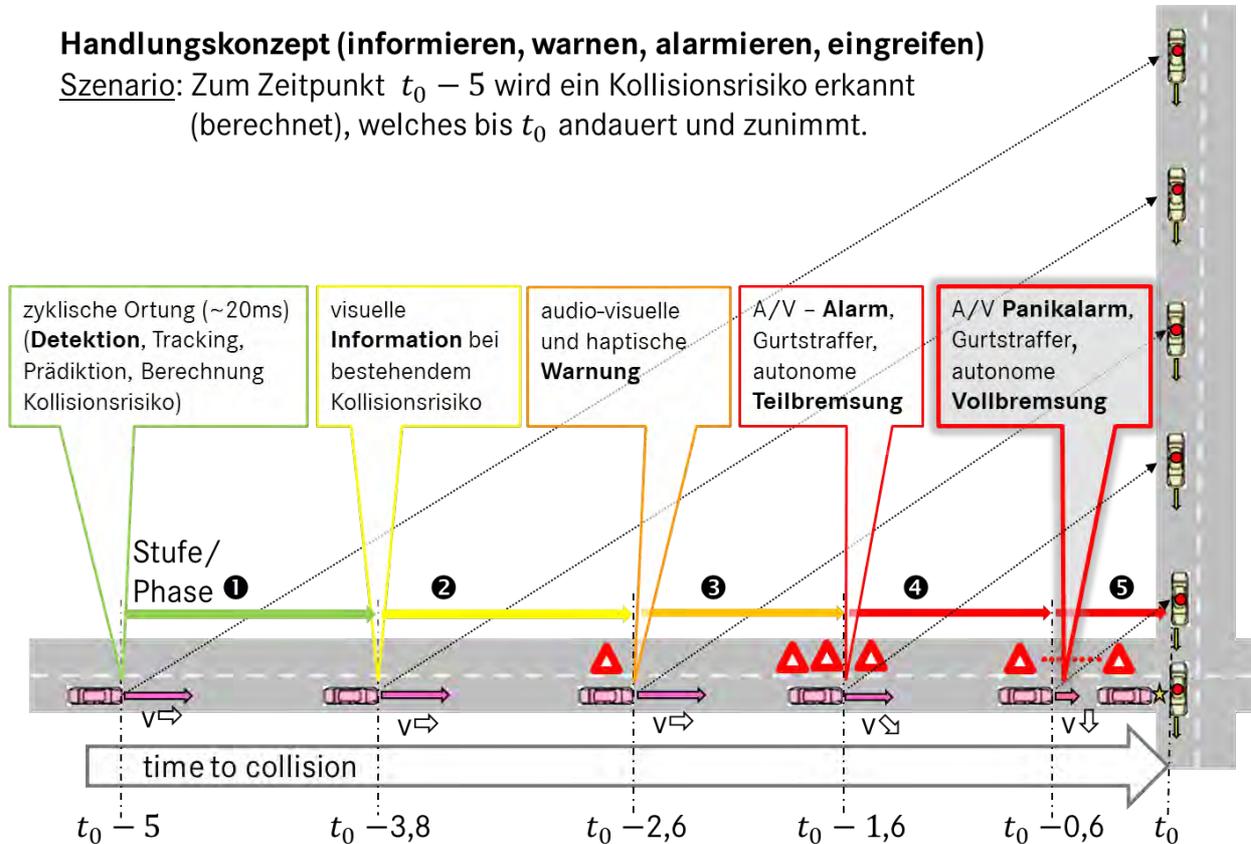


Abbildung 124: Handlungskonzept in fünf Stufen zur Einleitung von Schutzmaßnahmen

- Durch das RUS – System detektierte Objekte mit einer ttc von ca. 5 s. werden zyklisch verfolgt, deren Trajektorie vorausberechnet und das Kollisionsrisiko berechnet.
- Ab einer ttc von 4s. erfolgt eine optische Information des Fahrers.
- Ab 3s. erfolgt eine optische und akustische Warnung
- Ab 2s. wird ein optischer und akustischer Alarm ausgegeben, der Gurtstraffer angezogen und schließlich eine Bremsung eingeleitet.

Bei dem für Ko-TAG definierten und umgesetzten Handlungskonzept handelt es sich um eine reine Demoumsetzung. Dieses Handlungskonzept hat keinen Bezug zu einer vorhandenen oder möglichen Serienumsetzung, sondern dient(e) reinen Demonstrations- / Präsentationszwecken im Rahmen der Ko-FAS Abschlusspräsentation im September 2013.

#### 2.6.4.2.2 Fahrzeug – Systemintegration Rundumsicherheit

Zur Darstellung und Überprüfung der in Ko-TAG erzielten Ergebnisse im praktischen Einsatz, kamen zwei Versuchsträger der Daimler AG zum Einsatz. Bei den Versuchsträgern handelte es sich um eine S-Klasse der Baureihe W221 und einen smart der Baureihe MC451.



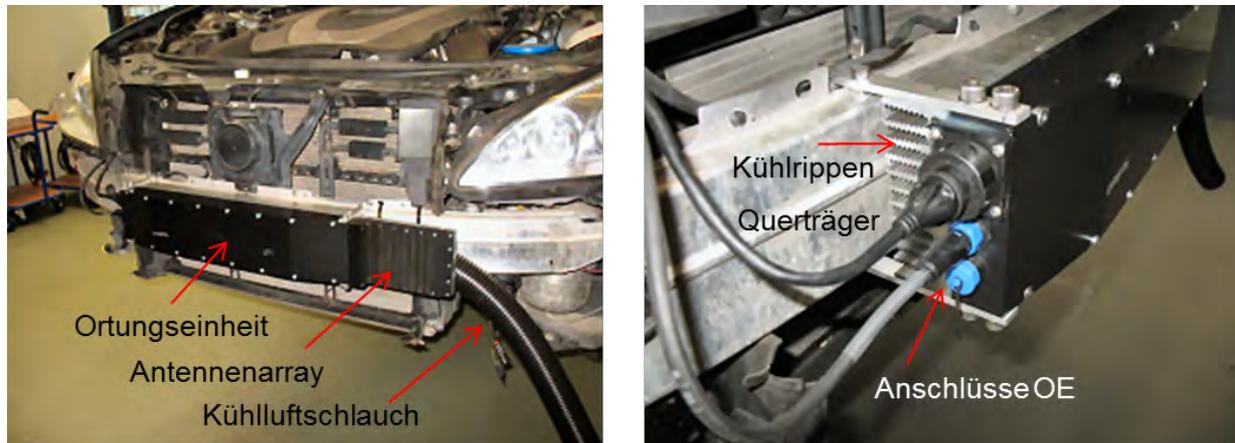
**Abbildung 125: Eingesetzte Versuchsträger für Systemintegration**

In beiden Fahrzeugen mussten spezifische Modifikationen durchgeführt werden, um das Schutzsystem für RUS (gemäß der Spezifikation in 2.1.2.4.4) in den Fahrzeugen integrieren zu können. Die Umsetzung eines „eingreifenden Systems“ gemäß dem mehrstufigen Handlungskonzept laut 2.6.4.2.1 wurde nur in der S-Klasse umgesetzt, da nur hier der erforderliche Grad der Sensorausrüstung (Fahrerassistenzsysteme) gegeben war.

Folgende Hardwarekomponenten und –Schnittstellen mussten u.a. in die/den Fahrzeuge/n integriert bzw. bereitgestellt werden:

- Stromversorgung für alle Komponenten
- Zugang zu den Fahrzeugbussen (CAN)
- Fusionseinheit (fahrzeugtauglicher PC)
- Ko-TAG Ortungseinheit samt Zubehör
- Ko-TAG Vehicle-TAG inklusive Antennen und Verkabelung
- Car-to-Car Kommunikationseinheit
- Zugriff auf Steuergeräte für Bremsengriff und Gurtstraffer
- Geeignete Zusatz-Hardware (CAN-Gateways) zur Manipulation des serienmäßigen Verhaltens von Steuergeräten
- Bedienfeld mit Schaltern und Tastern zur Steuerung aller Komponenten
- Zugriff auf HMI-Komponenten des Fahrzeugs (Fahrzeugdisplay, Kombiinstrument)

Besonders aufwendig gestaltete sich die Integration der Ko-TAG Ortungseinheit in den Stoßfänger des Fahrzeugs, da hier der benötigte Bauraum für das Volumen der OE nicht ohne weiteres zur Verfügung stand. Auch ist die OE an diesem Verbauort im Fahrzeug extremen Bedingungen ausgesetzt, die es unbedingt zu beachten galt.



**Abbildung 126: Integration der Ko-TAG OBU auf dem Querträger der S-Klasse**

Nach mehreren Iterationen wurde hier schließlich eine Lösung gewählt, bei welcher ein modifizierter Stoßfänger, mit einer aufgesetzten, gedruckten Haube („rapid prototyping“), zum Einsatz kam.



**Abbildung 127: Modifizierter Stoßfänger mit "Rapid Prototyping" OBU-Haube**

Um teilautonom/vollautonom in die Fahrzeugdynamik eingreifen zu können, bedarf es einer geeigneten Aktorik, bzw. zusätzlicher Hardware (CAN-Gateways), um die im Fahrzeug serienmäßig vorhandene Aktorik anzusteuern (Auslöseeinheit). Über diese CAN-Gateways war es möglich, die Steuergeräte für das Bremssystem des Fahrzeugs aus der serienmäßigen CAN-Bus-Architektur „herauszulösen“ und über modifizierte CAN-Botschaften zu manipulieren. Die Umschaltung zwischen Serienbetrieb und RUS-Betrieb erfolgt über einen HW-Schalter. Die Implementierung einer „Not-Aus – Logik“ (mit Not-Aus – Schalter im Armaturenbrett) und entsprechender HW-Logik stellt eine Rückfallebene dar, um jederzeit die vollständige (manuelle) Kontrolle über das Fahrzeug zurück zu erlangen.

Die komplette HW für die „Fahrerassistenz“ wurde auf einer der Trägerplatten im Kofferraum des Versuchsträgers implementiert.

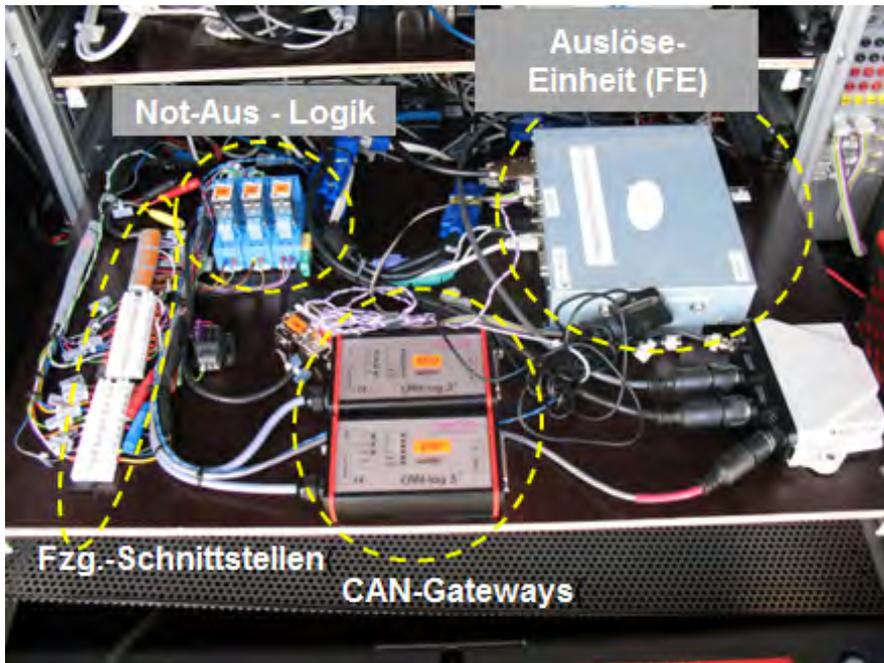


Abbildung 128: Hardware – Setup für Fahrerassistenz (Auslöseeinheit)

Die Umsetzung der Warnstrategie für das Schutzsystem Rundumsicherheit erfolgte über audio-visuelle „Reize“ und haptische Signale (reversibler Gurtstraffer), um den Autofahrer auf eine drohende Gefahr aufmerksam zu machen. Die Darstellung von Informationen und Warnungen erfolgte auf dem Seriendisplay (Headunit-Display) des Fahrzeugs. Akustische Warnungen wurden über den Aux-In – Eingang des Autoradios wiedergegeben.



Abbildung 129: HMI HW-Schnittstellen im Versuchsträger

Aber auch Elemente (Kollisionswarnlampe und Buzzer) im Kombiinstrument des Fahrzeugs wurden zur audio-visuellen Warnung des Fahrers gemäß der Warnstrategie genutzt und entsprechend angesteuert

## 2.6.5 Weitere Anwendungen

### 2.6.5.1 Eigenlokalisierung

Neben der Erkennung von Objekten im Fahrzeugumfeld ist die Kenntnis der eigenen Fahrzeugposition und -ausrichtung eine wichtige Grundlage für die Umsetzung von kooperativen Fahrzeugsicherheitsapplikationen. Diese ermöglicht die relative Positionierung zu anderen Objekten, deren globale Positionen beispielsweise aus der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation oder einem Backend-Server bekannt sind sowie die Bereitstellung der eigenen Position für andere Verkehrsteilnehmer. Weiterhin dient die Information der Zuordnung

innerhalb einer digitalen Karte, sodass sich beispielsweise Handlungsoptionen besser planen lassen oder eine verbesserte Situationsinterpretation vorgenommen werden kann.

### Lokalisierung durch Ko-TAG Landmarken

Das Ortungsprinzip kooperativer Sensorik eignet sich zur Umsetzung eines weiteren globalen Lokalisierungsansatzes. Dazu werden kooperative Transponder in die umgebende Infrastruktur integriert, deren Verbauort einmalig ermittelt wird. Aus den Abstands- und Winkelmessungen zu den kooperativen Landmarken sowie aus den an das Fahrzeug kommunizierten Verbauorten der Landmarken wird schließlich die globale Fahrzeugposition bestimmt.

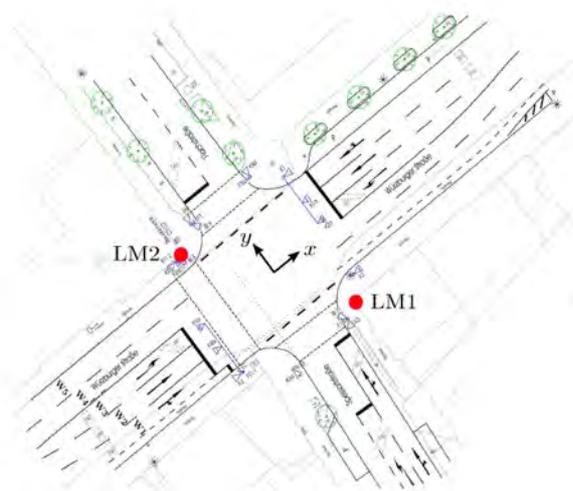


**Abbildung 130: Applikation der Ko-TAG Lokalisierung an der Ko-PER Versuchskreuzung mittels zweier, diagonal angeordneter kooperativer Landmarken in einer Höhe von ca. 4m und einem diagonalen Abstand von ca. 26,8m.**

Das Verfahren kombiniert somit Trilateration (RTOF) und Triangulation (AOA) zur Positionsbestimmung und unterscheidet sich damit grundlegend von satellitengestützten Verfahren. GNSS beruht auf dem Time-Difference-of-Arrival (TDOA) Messprinzip, sodass für eine Positionierung mindestens 4 Satelliten zum Schätzen des Sendezeitpunktes und der 3D-Koordinate erforderlich sind. Das Verfahren der kooperativen Landmarken erfordert hingegen durch die bekannte Höhe und das RTOF-Messprinzip lediglich 2 Landmarken zur eindeutigen Positionierung.

Die Genauigkeit von GNSS Systemen hängt dabei nicht nur von der Anzahl der sichtbaren Satelliten ab, sondern wird auch von der zeitabhängigen Satellitenkonstellation bestimmt. Die Anordnung der Ko-TAG Landmarken ist im Gegensatz individuell für einen bestimmten Einsatzort gewählt, unterliegt keinen zeitlichen Schwankungen und lässt sich unter Berücksichtigung einer möglichst wenig unterbrochenen Sichtverbindung bestimmen.

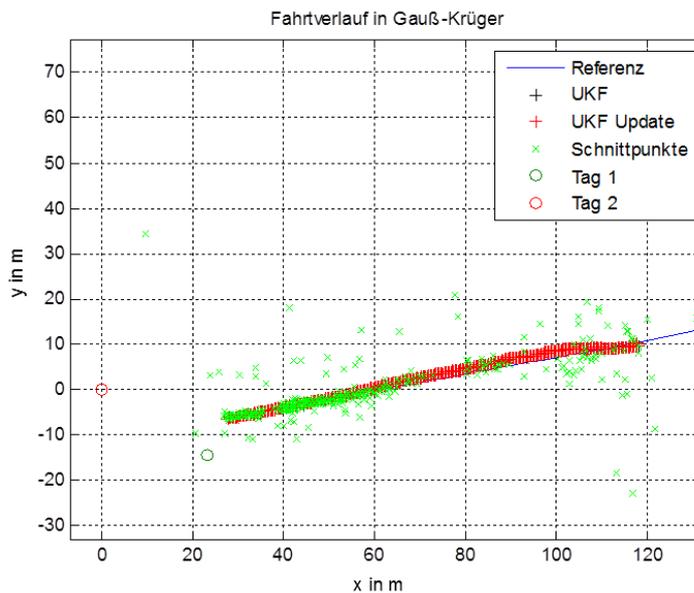
Die weitere Betrachtung erfolgt für die Anwendung an innerstädtischen Kreuzungen. Innerstädtische Kreuzungen stellen einen typischen Unfallschwerpunkt dar, für den bereits eine Reihe von Assistenzsystemen vorgestellt sind, die eine fahrstreifengenaue und konsistente Lokalisierung erfordern. Die Analyse erfolgt am Beispiel der Ko-PER Versuchskreuzung in Aschaffenburg. Die Abbildungen 1 und 2 veranschaulichen die Kreuzung und den Verbau zweier kooperativer Landmarken an gegenüberliegenden Eckpunkten der Kreuzung.



**Abbildung 131:** Veranschaulichung der kartierten Kreuzung mit beiden Landmarken. Das Koordinatensystem hat auf Grund der Übersichtlichkeit den Ursprung in der Kreuzungsmitte, die Koordinatenachsen verlaufen entlang der Spuren. Neben der Position  $\langle x, y \rangle$  wird durch die Eigenlokalisierung die Ausrichtung  $\gamma$  bestimmt, diese entspricht dem Winkel zwischen dem Vektor der Fahrzeuglängsachse und dem Einheitsvektor der x-Achse.

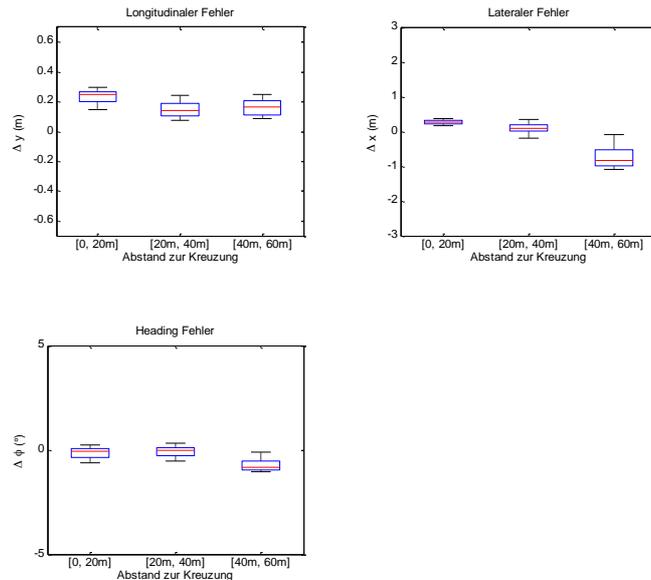
#### Erzielte Ergebnisse

Die Evaluierung des Filters erfolgte zunächst im Freifeld in der nachgestellten Geometrie der Aschaffener Kreuzung. Abbildung 132 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 im Projekt entwickelten Lokalisierungsfilters (rot). Ebenfalls sind die Positionen der Landmarken gekennzeichnet.



**Abbildung 132:** 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 an der Aschaffener Kreuzung.



**Abbildung 133: Longitudinale und laterale Positionsfehler sowie Fehler im Headingwinkel aller Testfahrten unter Verwendung der Aschaffener Kreuzungsgeometrie bei geringer Geschwindigkeit.**

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 nur wenig vom Abstand abhängig und liegt unterhalb von  $1^\circ$ .

Die Testfahrten wurden bei verschiedenen Geschwindigkeiten bis 50 km/h wiederholt. Durch die stärkere Bewegung des Fahrzeugs werden die Positionsfehler zusätzlich von der Prädiktionsfähigkeit des Fahrzeugmodells beeinflusst. Ebenfalls stehen pro zurück gelegter Längeneinheit weniger Messungen zur Verfügung, sodass Fehler weniger stark gemittelt werden. Wie aus diesen Überlegungen zu erwarten, zeigte sich demnach eine leicht erhöhte Streuung der Positionsdaten.

Ebenfalls zeigte sich eine Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen, das zu temporären Verdeckungen zwischen Fahrzeug und Landmarken führt. Unter diesen Bedingungen zeigt sich der Filter robust bezüglich des longitudinalen Fehlers und reagiert stärker bei den Fehlern der lateralen Position und des Headingwinkels. Eine Aussage über den Fahrstreifen kann nur mit einer vom Abstand abhängigen Wahrscheinlichkeit getroffen werden, beispielsweise mit ca. 90% Wahrscheinlichkeit innerhalb des Abstandsintervalls [20m; 40m].

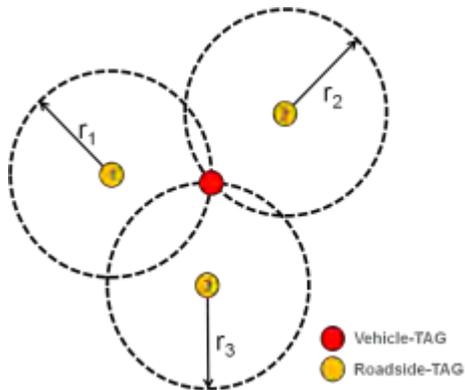
### 2.6.5.2 Transponder als stationäres Referenzsystem

Unter einem statischen Referenzsystem wird in diesem Zusammenhang ein System verstanden welches anhand fest in der Infrastruktur verbauter TAGs die Absolutposition eines oder mehrerer Objekte bestimmen kann.

#### Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip basiert auf der reinen Abstandsmessung auf Basis von Ko-TAG 1.0. Anhand des Laterationsansatzes wird somit die Eigenposition des Onboard(Vehicle)-TAGs berechnet aus den einzelnen Entfernungen zu den Roadside TAGs berechnet. Zur Berech-

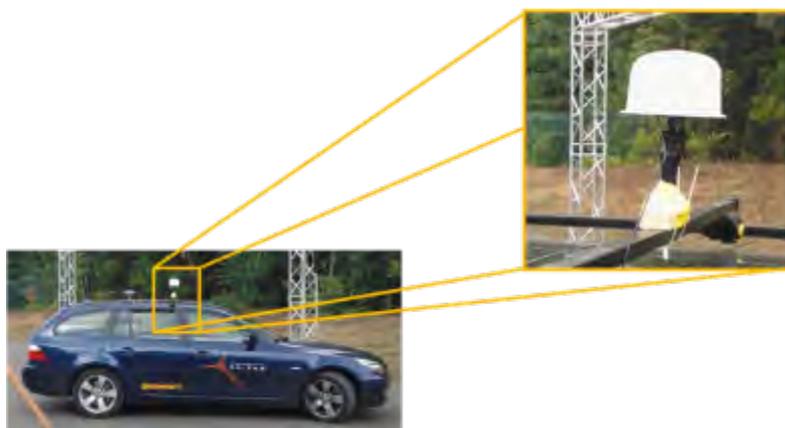
nung einer eindeutigen Position im zweidimensionalen Raum ergibt sich hierbei, dass mindestens drei Entfernungswerte zur Berechnung notwendig sind.



**Abbildung 134: Funktionsprinzip der Trilateration in zweidimensionalen Raum**

### System-Setup

Die Onboard-Einheit des eigenlokalisierten Objekts ist mit einem OBU-TAG der Ko-TAG 1.0 Generation 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 reduzieren zu können.



**Abbildung 135: Antenne der Onboard Einheit**

Neben der Ko-TAG 1.0 Einheit ist im Lokalisierungsobjekt eine Datenerfassungs- und Aufzeichnungseinheit verbaut, welche die Umrechnung der Entfernungsrohdaten in Positionsdaten durchführt und diese zeitgestempelt abspeichert. Dies ermöglicht eine spätere Fusion der Positionsdaten mit bspw. Umgebungsinformationen.



**Abbildung 136: Ständer eines Roadside-TAGs**

Mit einer Konfiguration von acht Roadside-TAGs und bis zu fünf Objekt-TAGs ist es derzeit möglich bei geforderter Genauigkeit ein Testfeld von ca. 100x500m abzudecken. Dies ist für die meisten Testszenarien ausreichend groß.

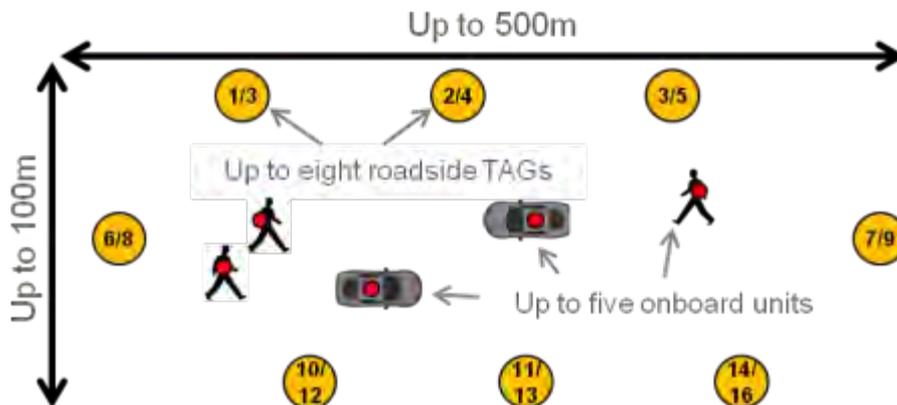


Abbildung 137: Mögliches Messfeld-Setup

### Messungen und Ergebnisse

Auf einem ehemaligen Flugplatzgelände in Aschaffenburg Nilkheim wurden Freifeldmessungen zur Überprüfung des Lokalisierungsansatzes durchgeführt. Hierzu wurden die Roadside-TAGs entlang einer alten Landebahn (vgl. Abb. 10) positioniert und verschiedene Manöver gefahren:

- Lineare Geradeausfahrt
- Bremsen/Beschleunigen
- ISO Spurwechsel
- Kreisfahrt
- Slalom

Zur Referenzierung der Positionsdaten wurde eine durch Inertialsensorik gestützte RTK-DGPS Lösung herangezogen unter der Annahme, dass dessen Abweichung von bis zu 2cm vernachlässigt werden kann.

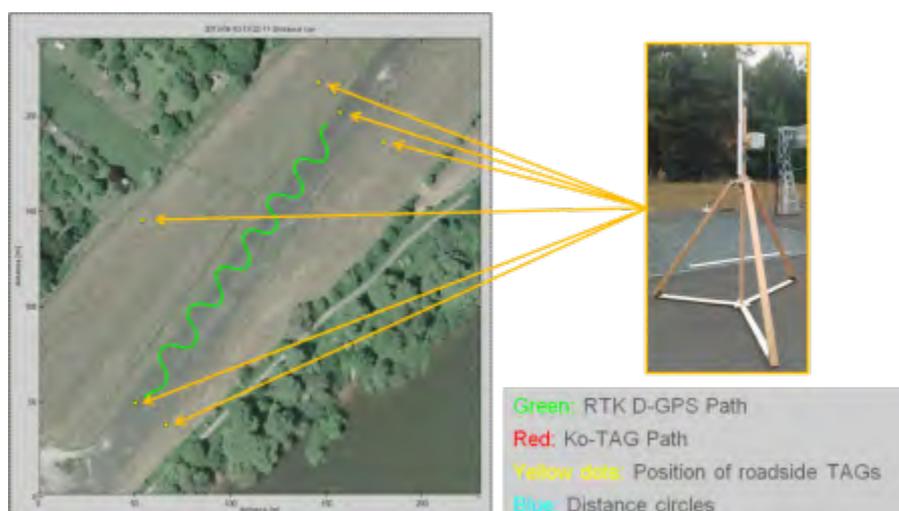


Abbildung 138: Beispiel einer Slalomfahrt auf dem Flugplatz Aschaffenburg Nilkheim

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen die hierbei ermittelten Abweichungen in einem karthesischen NED-Koordinatensystem. Man kann erkennen, dass eine durchschnittliche Abweichung von unter 0,08m im Vergleich zur RTK-DGPS Lösung vorliegt. Ebenfalls ist anhand

des blau gezeichneten Bereichs die vom Positionierungssystem geschätzte Standardabweichung der Eigenposition dargestellt.

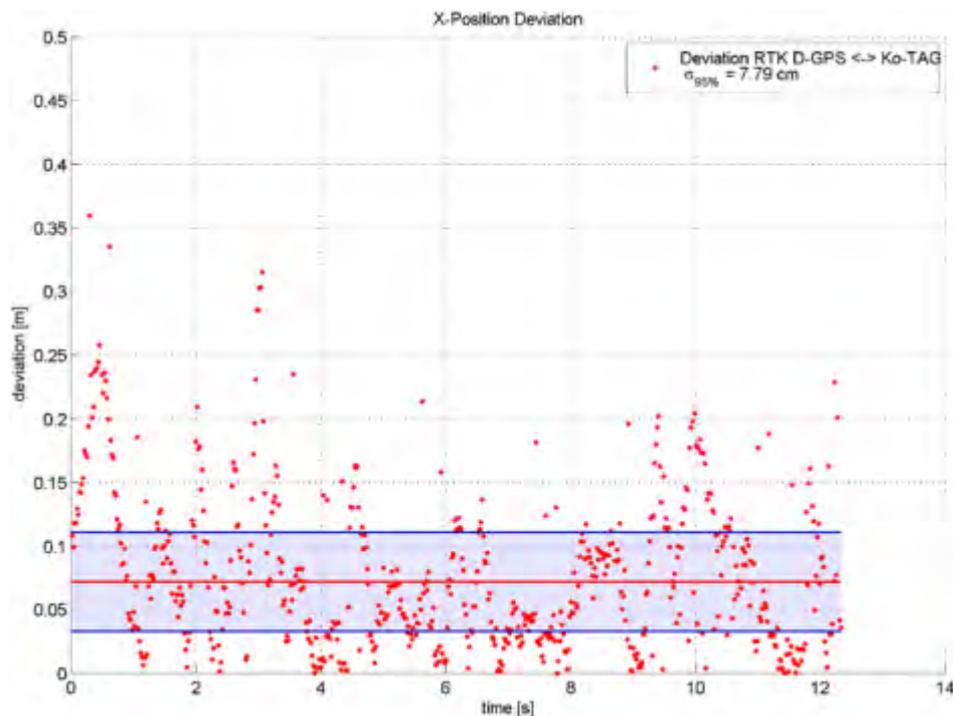


Abbildung 139: Positionsabweichung in X-Richtung

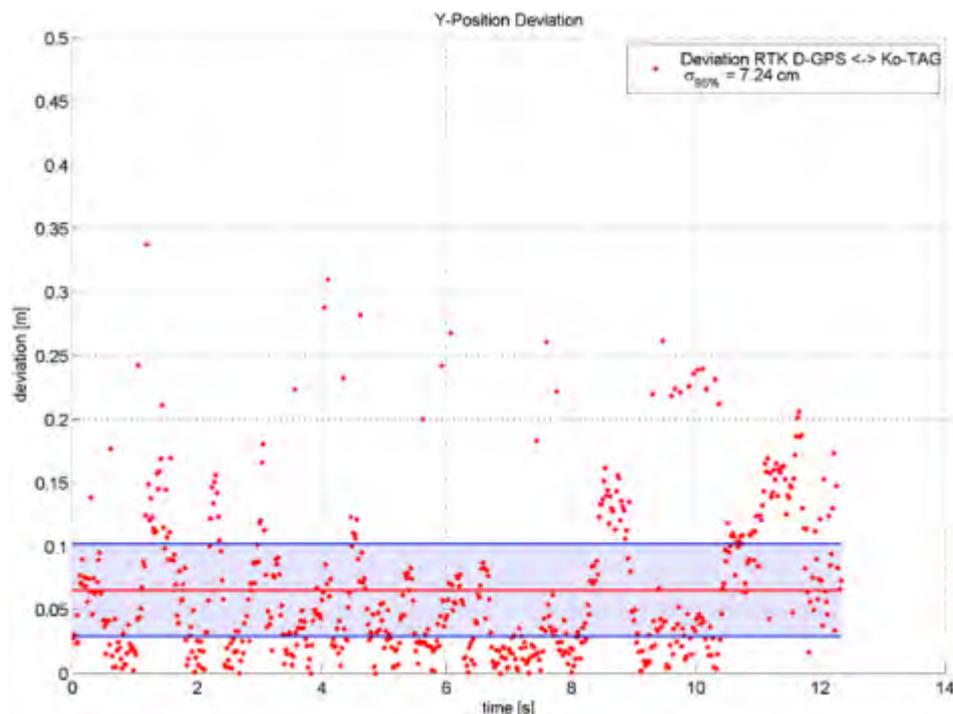


Abbildung 140: Positionsabweichung in Y-Richtung

### 2.6.5.3 Transponder als dynamisches Referenzsystem

#### System-Setup

Für das dynamische Referenzsystem wird ein Master-TAG auf dem Ego-Fahrzeug und ein Slave-TAG (ggf. auch mehrere Slave-TAGs) auf dem zu referenzierenden Target montiert. Weiterhin befindet sich im Ego-Fahrzeug eine Datenverarbeitungs- und Aufzeichnungseinheit. Die TAGs sind mit Antennen mit einer 180° Richtcharakteristik ausgestattet um etwaige Störungen durch Mehrwege weitestgehend zu reduzieren.



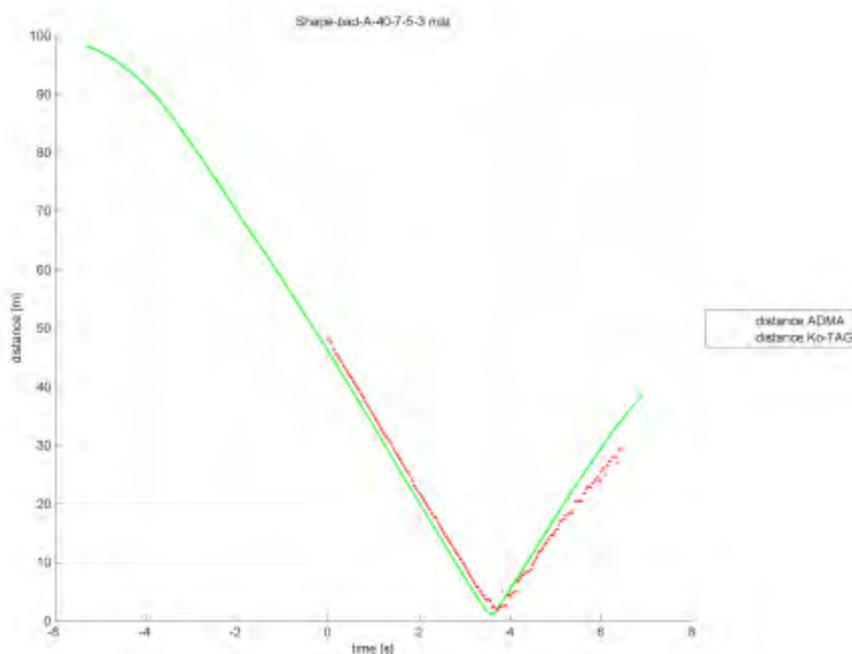
**Abbildung 141: Prinzip der eindimensionalen Objektreferenzierung für Notbremsassistenten**

### Datenverarbeitung

Die vom Master-TAG berechneten Entfernungswerte werden zunächst auf Plausibilität geprüft. Hierfür werden die Signalqualitätswerte und Entfernungsschwellen herangezogen. Die nach diesem Schritt zur Verfügung stehenden Rohdaten werden nachfolgend mittels eines Kalman Filters geglättet. Dieses basiert auf der Modellannahme, dass sich die Geschwindigkeit des gemessenen Objekts zwischen zwei Zeitschritten nicht verändert (cv-Modell). Etwaige Änderungen der Geschwindigkeit werden als Rauschterm modelliert. Neben der Filterung der Daten hat das Kalman-Filter die Aufgabe im Fall kurzer Messwertaussetzer (bspw. Nichtbestehen der Plausibilisierungsprüfung) durch Prädiktion weiterhin Entfernungswerte zu liefern. Zusätzlich ist man durch das Filter in der Lage die Relativgeschwindigkeit zum Target zu schätzen.

### Messungen und Ergebnisse

Die Messungen zur Überprüfung des Systems fanden auf der Continental Dynamic Area in Alzenau statt. Hierzu wurden ein Fahrzeug mit einem Master-TAG und ein Target mit einem Slave-TAG ausgestattet. Beide wurden weiterhin mit jeweils einem RTK-DGPS System ausgestattet um eine exakte Referenzposition zu erhalten. Die Abweichung des RTK-DGPS Systems von 2cm unter Idealbedingungen wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt. Das getestete Szenario enthält die lineare Anfahrt auf das Target mit Umfahrung ohne Kollision mit dem Target. Aus diesem Grund ist in der Abstandsmessung zunächst eine Verringerung des Abstands zu erkennen mit anschließender Vergrößerung desselben. Nach der Vorbeifahrt ist der Empfang aufgrund der Richtcharakteristik nicht mehr optimal, weswegen es hier zu einer gewissen Streuung kommt.



**Abbildung 142: Distanzwertvergleich Ko-TAG zu RTK-DGPS**

Die vorhergehende Abbildung zeigt den Distanzwertvergleich des Ko-TAG Systems mit dem RTK-DGPS Systems. Der grobe Offset 2m ist in den unterschiedlichen Antennenpositionen

begründet. Nach Korrektur dieses Offsets wird eine durchschnittliche Abweichung des Distanzwerts von 0,1m zum Referenzentfernungswert erreicht.

### 3 Anhang A (öffentlich): Publikationen und Konferenzbeiträge

Im Projektverlauf wurden von den Partnern des Ko-TAG-Konsortiums die folgenden nationalen und internationalen Beiträge zur Publikationen angenommen bzw. veröffentlicht (in zeitlicher Reihenfolge):

#### 2010

- [1] Ralph H. Rasshofer, Axel Sikora, "*Cooperative Sensors Using Localization and Communication for Increased VRU Safety*", 4th Int'l Conf. on Sensing Technology (ICST), 3.-5. Juni 2010, Lecce
- [2] Dirk Lill, Alexander Gutjahr, Manuel Schappacher, Axel Sikora, "*Development of a Wireless Communication and Localization System for VRU eSafety*", 2nd International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars), 21. Juli 2010, Newcastle
- [3] Dirk Lill, Alexander Gutjahr, Manuel Schappacher, Axel Sikora, "*Cooperative Sensor Networks for VRU eSafety*", 5th Int'l Conf. on Systems and Networks Communications (ICSNC), 22.-27. August 2010, Nizza

#### 2011

- [4] Bernhard Schaffer, "*Kooperative Sensorik für die präventive Sicherheit im Straßenverkehr*", RFID im Blick, März 2011
- [5] Dirk Lill, Axel Sikora, "*Cooperative Wireless Sensing for Increased Traffic Safety*", Embedded World Conference, 1. März 2011, Nürnberg
- [6] Daniel Schwarz, Horst Kloeden, Ralph Rasshofer, "*Ko-TAG - Cooperative Sensor Technology for Traffic Safety Applications*", International Workshop on Intelligent Transportation, 22.-23. März 2011, Hamburg
- [7] Udo Geissler, Andreas Trebing, Daniel Westhofen, Stephan Zecha, "*Intelligent collision risk prediction using cooperative sensor systems*", International Workshop on Intelligent Transportation, 22.-23. März 2011, Hamburg
- [8] Dirk Lill, Manuel Schappacher, Shaidul Islam, Axel Sikora, "*Wireless Protocol Design for a Cooperative Pedestrian Protection System*", 3rd International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars), 23. März 2011, Oberpaffenhofen
- [9] Axel Sikora, "*Cooperative Sensor Systems for eSafety Applications*", Workshop "How can new sensor technologies impact next generation safety systems", IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 5. Juni 2011, Baden-Baden
- [10] Horst Kloeden, Daniel Schwarz, Ralph H. Rasshofer, Erwin M. Biebl, "*Vehicle Localization using Cooperative RF-based Landmarks*", IV 2011 – IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 5.-9. Juni 2011
- [11] Stephan Kern, Daniel Westhofen, Stephan Zecha, "*Intelligente Kollisionsrisikoermittlung mit kooperativer Sensortechnologie*", 6. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 29.-30. Juni 2011
- [12] Gerrit Kalverkamp, Bernhard Schaffer, Erwin M. Biebl, "*A cooperative transponder system with localization and data link capabilities for improved traffic safety*", Kleinheubacher Tagung 2011 der U.R.S.I. International Union of Radio Science, 27. September 2011
- [13] Dr. Felix Klanner, Horst Klöden, Dr. Ralph H. Rasshofer, Andreas Rauch, Dr. Daniel Schwarz (BMW) "*Kooperative Ansätze zur Fahrzeugumfeldwahrnehmung*", 8. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit, 5. Oktober 2011
- [14] Dr. Ralph H. Rasshofer, Dr. Daniel Schwarz (BMW) "*Kooperative Sicherheit - Kooperative Sensorik zur Steigerung von Fahrzeugsicherheit und Fahrkomfort*", Elektronik automotive, November 2011
- [15] Malek Chaabane, Gerrit Kalverkamp, Bernhard Schaffer, Erwin M. Biebl, "*A cooperative transponder system for improved traffic safety, localizing road users in the 5 GHz band*", Fachjournal Advances in Radio Science, Dezember 2011

## 2012

- [16] Axel Sikora, "Security Solutions for Highly Dynamic Car2X Networks", Nets4Cars/Nets4Trains 2012, 25.-27. April 2012, Vilnius
- [17] Daniel Schwarz, "Kooperative Sensoren für Fahrzeugsicherheit - Erweiterung von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation mit Funkortungstechnologien", ATZ elektronik, 1. Mai 2012
- [18] 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
- [19] Horst Kloeden, Daniel Schwarz, Erwin M. Biebl, Ralph H. Rasshofer, "Effectiveness Study of Cooperative Sensor Systems for VRU-Safety", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 3.-7. Juni 2012, Alcalá de Henares
- [20] Marc Faßbinder, "Sicherheit von Fußgängern durch kooperative Ortung - Projekt Ko-TAG erforscht Car-to-X-Kommunikation", RFID im Blick, 28. September 2012
- [21] Horst Klöden, Bernhard Schaffer, Ralph Raßhofer, Erwin Biebl, "Potential kooperativer Radarsysteme im Automobil", ITG-Fachtagung: Radare in der digitalen Welt - Technologietrends & Applikationen, 8. November 2012, München

## 2013

- [22] Axel Sikora, "A highly scalable IEEE802.11p communication and localization subsystem for increased vehicular", 5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WIVEC), 2. Juni 2013, Dresden
- [23] Bernhard Schaffer, Gerrit Kalverkamp, Erwin Biebl, "A 5.8 GHz Cooperative Transponder System for Localization and Communication in Traffic Safety Applications", IEEE 78th Vehicular Technology Conference Fall (VTC), 2.-5. September 2013, Las Vegas
- [24] Gerrit Kalverkamp, Bernhard Schaffer, Erwin Biebl, "OFDM-Based Ranging Approach for Vehicular Safety Applications", IEEE 78th Vehicular Technology Conference Fall (VTC), 2.-5. September 2013, Las Vegas
- [25] Gerrit Kalverkamp, Erwin Biebl, "Augmentation of Minimum Redundant Radar Observations for Improved Estimation Performance", Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 24.-26. Oktober 2013, Hangzhou
- [26] Axel Sikora, Manuel Schappacher, "A highly scalable IEEE802.11p communication and localization subsystem for autonomous urban driving", 2nd Int'l Conference on Connected Vehicles & Expo (ICCVE), 2.-6. Dezember 2013, Las Vegas
- [27] Gerrit Kalverkamp, Erwin Biebl, "A Signal Adaptive Time of Arrival Estimation Algorithm Based on Polynomial Rooting", 1st IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), 3.-5. Dezember 2013, Austin
- [28] Horst Kloeden, Daniel Schwarz, Erwin M. Biebl, Ralph H. Rasshofer, "Fusion of Cooperative Localization Data with Dynamic Object Information using Data Communication for Preventative Vehicle Safety Applications." In: Advances in Radio Science 11 (2013)
- [29] Horst Kloeden, Nesrine Damak, Ralph H. Rasshofer, Erwin M. Biebl, "Sensor resource management with cooperative sensors for preventive vehicle safety applications", SDF 2013 – Workshop on Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications (SDF), Bonn

## 2014

- [30] Horst Kloeden, "Fahrzeugsicherheit durch kooperative Sensorik", Dissertation TU München, 01.04.2014, ISBN 978-3843914772