

## Forschungsprojekt

# UR:BAN – Vernetztes Verkehrssystem

## Schlussbericht

Beitrag des **ifak - Institut für Automation und Kommunikation e. V.  
Magdeburg**

Zuwendungsempfänger: **Werner-Heisenberg-Str. 1  
39106 Magdeburg**

zu den Teilprojekten: **SK – Smarte Kreuzung  
KI – Kooperative Infrastruktur**

**Laufzeit: 01.01.2012 – 31.12.2015**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen **19 P 11007 I** gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Magdeburg, 12.08.2016**



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und kurze Übersicht</b>	<b>5</b>
1.1	Aufgabenstellung und Gesamtziel des Projektes	5
1.2	Aufgabenstellung des ifak	7
1.3	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
1.4	Planung und Ablauf von UR:BAN – VV	9
1.4.1	Planung und Ablauf im Teilprojekt SK	9
1.4.2	Planung und Ablauf im Teilprojekt KI	13
1.5	Stand der Wissenschaft und Technik	16
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	18
<b>2</b>	<b>Radfahrer-Schutzeinrichtung – RSE</b>	<b>20</b>
2.1	Motivation, Konzept und Arbeitsschwerpunkte	20
2.2	Integration von schwachen Verkehrsteilnehmern über Smartphones	21
2.3	Integration von Fahrzeugen über WLANp	24
2.4	Road Side Unit als Mediator zur Verarbeitung von WLANp- und WLAN-Daten	28
2.5	Radare zur Verbesserung der Erkennung	32
2.6	Vorhersage von Kollisionen und Versand von Warnungen durch die RSU	35
2.7	Ergebnisse der Feldtests und Abschlussdemonstration	39
2.8	Erhebung über geeignete Möglichkeiten zur Warnung von Radfahrern mittels interaktiver Simulation und Befragung	42
2.9	Simulative Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen	46
2.10	Verwendung der Zuwendung sowie Gegenüberstellung der vorgegebenen mit den erreichten Zielen	49
2.11	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	50
2.12	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse	51
<b>3</b>	<b>Kooperative Schutzeinrichtung – KSE</b>	<b>54</b>
3.1	Motivation, Ausgangslage und Ziele	54
3.2	Übersicht und Darstellung	57
3.3	Intelligenter Leitkegel	62
3.4	Der Leitkegel-Server	71
3.5	Road Side Unit (RSU) im Kontext der KSE	82
3.6	Verbreitung der KSE-Informationen an die Verkehrsteilnehmer	84
3.7	Konfigurations-App des Intelligenten Leitkegels	87
3.8	GNSS-module und präzise Lokalisierung	91
3.9	Test- und Prüffelder der Applikation SK-35	105
3.10	Zusammenfassende Ergebnisse, Evaluierung und Bewertung der KSE (SK-35)	109

3.11	<i>Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</i> .....	119
3.12	<i>Nutzen und Verwertung der Ergebnisse</i> .....	122
<b>4</b>	<b>Testen kooperative Systeme und Car2X-Applikationen</b> .....	<b>128</b>
4.1	<i>Testsystem für kooperative Systeme und Car2X-Applikationen</i> .....	128
4.1.1	<i>Motivation</i> .....	128
4.1.2	<i>Testframework für hochverteilte Car2X-Applikationen</i> .....	128
4.1.3	<i>Verkehrssimulationen zur Testdatenerzeugung und Stimulation durch Car2X-Daten</i> ..	130
4.1.4	<i>Monitoring und automatisierte Auswertung der Netzwerkkommunikation</i> .....	133
4.1.5	<i>Case Study für Testen der Urban-Applikation Radfahrschutzeinrichtung</i> .....	134
4.2	<i>Leitfaden für den Test kooperativer Systeme</i> .....	137
4.2.1	<i>Vorgehen für den Test kooperativer Systeme im Verkehr</i> .....	138
4.2.2	<i>Testautomatisierung</i> .....	139
4.2.3	<i>Frühe Fehleridentifikation im Betrieb durch Monitoring</i> .....	140
4.2.4	<i>Zusammenfassung</i> .....	140
4.3	<i>Nutzen und Verwertung der Ergebnisse</i> .....	141
<b>5</b>	<b>Ergebnisverbreitung</b> .....	<b>143</b>
5.1	<i>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</i> .....	143
5.2	<i>Veröffentlichungen</i> .....	144
5.2.1	<i>Konferenzen</i> .....	144
5.2.2	<i>Fachzeitschriften</i> .....	145
5.2.3	<i>Messen</i> .....	145
5.3	<i>Gebrauchsmusteranmeldung für den Intelligenen Leitkegel</i> .....	147
<b>6</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>148</b>
6.1	<i>Abkürzungsverzeichnis</i> .....	148
6.2	<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	150
6.3	<i>Tabellenverzeichnis</i> .....	154
6.4	<i>Literaturverzeichnis</i> .....	155

# 1 Einleitung und kurze Übersicht

## 1.1 Aufgabenstellung und Gesamtziel des Projektes

Das Vorhaben „Vernetztes Verkehrssystem“ (UR:BAN-VV) war in die Forschungsinitiative UR:BAN mit dem Ziel eingebunden, die Verkehrseffizienz in urbanen Räumen bei gleichzeitiger Senkung des Emissionsausstoßes zu optimieren. Dieses Ziel wird durch den Ausbau von intelligenter Infrastruktur und deren Vernetzung mit intelligenten Fahrzeugen unter spezieller Berücksichtigung neuer Antriebskonzepte (Elektro- und Hybridantriebe) erreicht. Applikationen zur intelligenten Lenkung des Verkehrs sowohl unter Berücksichtigung der aktuellen und prognostizierten Nachfrage als auch unter Berücksichtigung von ökologischen Optimierungspotentialen gehen Hand in Hand mit intelligenten Fahrerassistenzsystemen zur Optimierung der Fahreffizienz und des Energieverbrauchs.

Applikationen für ein energie- und verkehrseffizientes Fahren standen somit im Zentrum der Säule „Vernetztes Verkehrssystem“ der Forschungsinitiative UR:BAN. Zukünftige fahrzeugseitige Assistenzsysteme sind auf die Charakteristik unterschiedlicher Antriebssysteme abzustimmen. Die Interaktion mit der Infrastruktur liefert dazu die erforderlichen Umfeldinformationen aus dem straßenseitigen Verkehrssystem. Gleichzeitig eröffnen sich aber auch neue Möglichkeiten, die Infrastruktursteuerung unter Nutzung der jeweils spezifischen Charakteristika der Antriebssysteme zu optimieren.

Die Säule „Vernetzte Verkehrssysteme“ des Forschungsprojekts UR:BAN sollte Möglichkeiten aufzeigen, wie in der Zukunft Fahrzeuge individuell im Netz geleitet werden können. Die Säule bestand dabei aus den Teilprojekten „Smarte Kreuzung“, „Urbane Straßen“, „Regionales Netz“ und „Kooperative Infrastruktur“, wobei das ifak in den Teilprojekten „Smarte Kreuzung“ und „Kooperative Infrastruktur“ aktiv beteiligt war.

Das Teilprojekt „Smarte Kreuzung“ adressierte dabei das Umfeld von städtischen, hoch ausgelasteten Knotenpunkten mit unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern wie Fahrzeugen, ÖPNV, Radfahrern, Fußgängern und auch Sondereinsatzfahrzeugen. Auf Grund der hohen Auslastung und der vielfältigen Ansprüche kann in diesem Umfeld nicht mit einer optimalen Grünen Welle wie im Teilprojekt „Urbane Straßen“ für die Fahrzeuge gerechnet werden. Insofern lag der Schwerpunkt des Teilprojektes in dem verbesserten Umgang mit Halten, wobei jedoch der gesamte Ablauf aus Einfahren, Fahrspurwahl, Halten und Überqueren der Kreuzung im Gesamtzusammenhang abgebildet wird.

Die „Smarte Kreuzung“ wird damit durch ein komplexes, dynamisches Umfeld charakterisiert. Die genannten Fahrmanöver erfolgen in der unübersichtlichen Situation rein reaktiv und bieten allen Beteiligten nur geringe Möglichkeiten für ein vorausschauendes Handeln. Aus diesem Grund stehen der kooperative Austausch an Informationen zwischen lokaler Lichtsignalanlage, Fahrzeugen, ÖPNV, Einsatzfahrzeugen sowie Radfahrern und Fußgängern im Mittelpunkt der „Smarten Kreuzung“. Die erweiterte Wissensbasis wird genutzt, um durch vorausschauendes Handeln die Ziele „Vermeiden von Halten“, „Verringern der Auswirkungen von Halten“ und „Verbesserung der Verkehrskapazität“ zu

verfolgen. Insgesamt soll somit erreicht werden, dass der Kreuzungsverkehr effizienter und mit weniger Emissionen abgewickelt werden kann.



Abbildung 1: Optimierungsziele und Komponenten im TP Smarte Kreuzung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden in diesem Zusammenhang sowohl fahrzeugseitig als auch infrastrukturseitig Applikationen untersucht und prototypisch umgesetzt.

Im Teilprojekt „Kooperative Infrastruktur“ stand die Übertragbarkeit und Erarbeitung von Referenzsystemen auf Seiten der Öffentlichen Hand im Mittelpunkt. Damit sollte ein wesentlicher Beitrag zur Einführung kooperativer Systeme in den Kommunen geleistet werden.

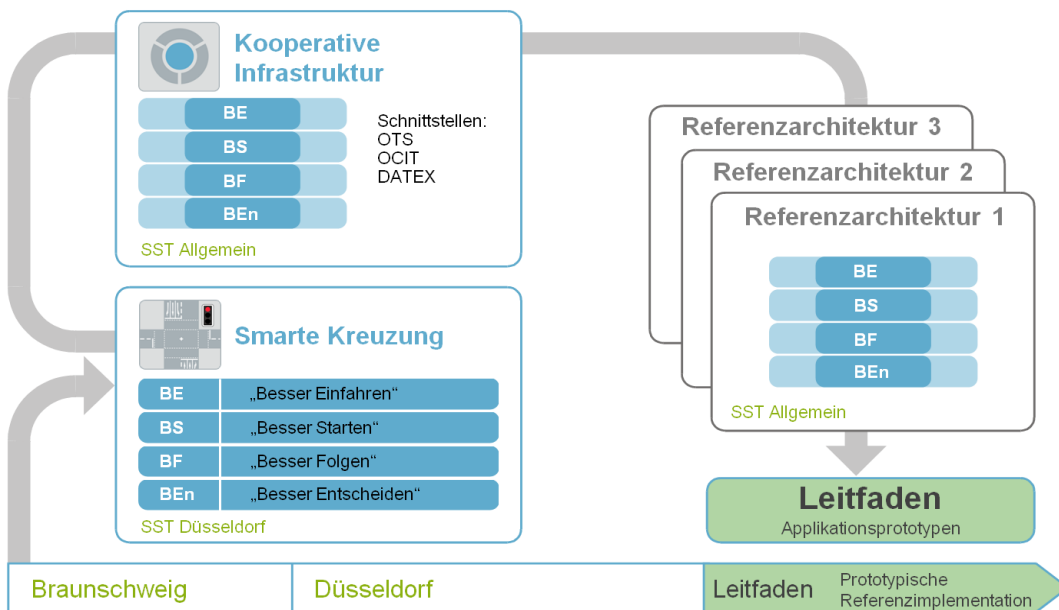


Abbildung 2: „Kooperative Infrastruktur“

Ein für das ifak relevantes Teilgebiet des Teilprojekts „Kooperative Infrastruktur“ war das Erarbeiten von praxisnahen Testkonzepten für kooperative Applikationen. Auch hiermit sollte ein Beitrag zur Erleichterung der Einführung kooperativer Systeme in den Kommunen geleistet werden.

## 1.2 Aufgabenstellung des ifak

Das 1992 gegründete ifak e. V. Magdeburg ist ein ingenieurwissenschaftliches, gemeinnütziges Forschungsinstitut. Es engagiert sich besonders in vorwettbewerblichen, nationalen und europäischen Verbundprojekten mit Forschung und Industrie. Das Geschäftsfeld Verkehr und Assistenz entwickelt Methoden, Verfahren und technische Systeme für neue Mobilitätskonzepte und kooperative Applikationen im Verkehrsbereich.

Im Rahmen des Projektes UR:BAN bearbeitete das ifak schwerpunktmäßig die folgenden Themenfelder in den Teilprojekten Smarte Kreuzung (SK) und Kooperative Infrastruktur (KI):

- Die SK-Anwendung „Radfahrer-Schutzeinrichtung“ (RSE) sollte die infrastrukturbasierte Einbindung von Fahrradfahrern und Fußgängern im Kreuzungsbereich ermöglichen. Über Car2X-Kommunikation (WLANp) auf Seiten von KFZ, WLAN-Kommunikation auf Seiten schwacher Verkehrsteilnehmer als auch über Radare auf Seiten der Infrastruktur werden vor allem Positions- und Bewegungsdaten gesammelt, um Trajektorien und potentielle Konflikte zwischen Verkehrsteilnehmern frühzeitig zu erkennen. Über drahtlose Kommunikation werden entsprechende Individuen gewarnt. Bei der Entwicklung waren folgende Aufgabenschwerpunkte zu konzipieren und umzusetzen:
  - Aufstellen von Anwendungsszenarien und Plänen der Zusammenarbeit mit anderen Akteuren von UR:BAN VV SK (→ Datenschnittstellen)
  - Erstellen eines Systemverbundes, bestehend aus kommunizierenden Verkehrsteilnehmern sowie einer straßenseitigen Infrastruktureinrichtung (Road Side Unit)
  - Sammeln von Statusdaten von Fahrzeugen über WLANp
  - Sammeln von Statusdaten von schwachen Verkehrsteilnehmern über WLAN und geeignete Smart Devices
  - Unterstützen der Erkennung von Verkehrsteilnehmern über Radarsensoren
  - Berechnen von Trajektorien der Verkehrsteilnehmer und letztendlich eines Konfliktpotentials mithilfe der Road Side Unit
  - Ggf. Warnen von betroffenen Fahrzeugen über WLANp bzw. betroffenen schwachen Verkehrsteilnehmern über WLAN
  - Erprobung am ifak sowie auf Testfeldern in Braunschweig und Düsseldorf
  - Durchführen einer Abschlusspräsentation auf dem Parkplatz des Messegeländes Düsseldorf sowie entsprechender Fahrdemonstrationen
- Die SK-Anwendung *Kooperative Schutzeinrichtung* (KSE) ist eine infrastrukturseitige Anwendung mit einem hohen Verflechtungsgrad zu anderen fahrzeug- und infrastrukturseitigen Applikationen der Smarten Kreuzung, wie etwa dem Kreuzungslotsen oder dem Mikrorouting. Die Anwendung (Intelligenter Leitkegel oder Sperreinrichtung) stellt ortsbezogene Informationen über nicht geplante, unvorhersehbare Hindernisse (Baustellen, Unfälle, Sperrungen) unmittelbar für andere Anwendungen bereit. Wichtige Aufgabenschwerpunkte bei Entwicklung der KSE waren:
  - Saubere und umfassende Spezifikation aller Schnittstellen für den Datenaustausch mit anderen Applikationen der SK,
  - Entwicklung der Hardware des Intelligenen Leitkegels als Front-End-Device der Kooperativen Schutzeinrichtung,
  - Entwicklung der verteilten Softwareanwendungen der KSE,

- Untersuchungen auf dem Gebiet der genauen Ortung als eine der Kernfunktionen des Intelligenzen Leitkegels,
  - Integration und ausführliche Tests aller Komponenten der KSE in den verschiedenen Test- und Prüffeldern,
  - Aufbau der Fahr-/Demonstratoren sowie die Durchführung der entwickelten Demonstrationsszenarien
- Im Teilprojekt Kooperative Infrastruktur (KI) wurde ein System zum automatischen Testen von kooperativen Systemen und Car2X-Applikationen realisiert. Es sollte mit dem neuen Testsystem möglich sein, einzelne Komponenten wie Fahrzeuge oder Road Side Units als ganze Systemverbünde kooperativer Komponenten einfach und effizient zu testen. Hierfür wurden Konzepte und Umsetzungen entwickelt, um über verfügbare Funkschnittstellen Stimulation und Beobachtungen zu ermöglichen. Der Fokus lag zunächst auf das Testen von Car2X-Applikationen. Es bestanden folgende Aufgabenschwerpunkte:
    - Ermittlung von Use Cases, bei denen kooperative Applikationen und Systeme über Car2X-Kommunikation beeinfluss- und beobachtbar sind
    - Spezifikation und Umsetzung eines verteilten Testsystems, bestehend aus einem Testmanager zum Parametrieren und Kontrollieren von Testfällen, Testkomponenten zum Erzeugen der Testdaten für die Stimulation der entsprechenden zu testenden Systeme, Testkomponenten zum Darstellen und Auswerten der Kommunikation auf der Luftschnittstelle und Testkomponenten zum Beobachten und Auswerten der einzelnen Systemkomponenten
    - Parametrieren, Starten und Beurteilen von Testfällen im Testmanager über eine geeignete, grafische Oberfläche, samt Fernsteuerung aller beteiligten, verteilten Testkomponenten
    - Integration von Verkehrssimulationswerkzeugen, um für jeden Zeitschritt reale Testdaten zu erzeugen (z. B. WLANp-CAMs für KFZ)
    - Erstellung von Konzept und Umsetzung zur Beobachtung, Visualisierung und Auswertung von Kommunikationspaketen auf dem jeweiligen Kommunikationsmedium
    - Zentrale Auswertung nacheinander ausgeführter Tests zur Beurteilung der korrekten Funktion der getesteten Applikationen

Daneben sollte in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern ein Testleitfaden erstellt werden, der den Kommunen und industriellen Anwendern eine wichtige Hilfe für die Planung und Bearbeitung von Testaktivitäten zur Einführung und Qualitätssicherung kooperativer Systeme in der Zukunft sein soll.

Für eine eingehende Darstellung der Ergebnisse zu den bearbeiteten Themenfeldern wird auf den Berichtsteil II verwiesen.

### **1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Im Forschungsvorhaben UR:BAN-VV arbeiteten die beteiligten Partner aus öffentlicher Hand, Privatwirtschaft und Forschung eng zusammen und verfügten über die notwendige Erfahrung, um die gestellten Aufgaben in einem Verbundvorhaben gemeinsam zu bewältigen. Zu diesem Zweck haben alle Partner vor Beginn des Vorhabens einen



gemeinsamen Kooperationsvertrag unterzeichnet und sich bereit erklärt, die andern Partner bei der Erreichung der jeweiligen Ziele zu unterstützen.

Neben den wirtschaftlichen, rechtlichen und organisatorischen Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens UR:BAN-VV waren einige technische Rahmenbedingungen förderlich für die Projektdurchführung. Die angestrebten neuen Applikationen und Systeme für vernetzte Verkehrsteilnehmer wurden dadurch wesentlich befördert, dass (Serien-)Fahrzeuge und Infrastruktursysteme zunehmend mit entsprechender Kommunikationstechnik ausgerüstet sind und zukünftig noch mehr ausgerüstet sein werden. Damit sind wesentliche Voraussetzungen geschaffen, mit denen die Nachhaltigkeit der Projektresultate aus UR:BAN-VV gewährleistet werden können.

## **1.4 Planung und Ablauf von UR:BAN – VV**

In UR:BAN-VV war das ifak in den Teilprojekten Smarte Kreuzung SK und Kooperative Infrastruktur KI vertreten. Planung und Ablauf der entsprechenden Themenkomplexe werden im Folgenden beschrieben.

### **1.4.1 Planung und Ablauf im Teilprojekt SK**

Das Teil-Projekt SK gliederte sich in vier Phasen. Diese wurden mit entsprechenden Arbeitspaketen (AP) im Projektplan unterlegt dargestellt. Ergänzend kam das AP1000 Projektmanagement und Dokumentation und das AP 5000 Evaluierung und Bewertung hinzu. Für alle wichtigen Projektphasen wurden dedizierte Meilensteine definiert, die auch gleichzeitig den Abschluss der entsprechenden Arbeitspakete darstellten und mit einem umfangreichen Bericht zusammengefasst wurden. Die Planung und der Ablauf im Teilprojekt SK stellten sich dabei wie folgt dar:

#### **AP2000 – Spezifikation**

In der ersten Projektphase (AP 2000) wurden neben einer detaillierten, partnerübergreifenden Beschreibung des Gesamtsystems und der Definition von Anwendungsfällen in erster Linie die Schnittstellen der entsprechenden Applikationen spezifiziert. Darüber hinaus wurden auch wichtige Anforderungen und Rahmenbedingungen, z. B. an die Infrastruktur, definiert, um die ordnungsgemäße Funktion sowie die Portierbarkeit der entwickelten Anwendungen zu gewährleisten.

Da es sich sowohl bei der Radfahrer-Schutzeinrichtung als auch bei der Kooperativen Schutzeinrichtung um Anwendungen mit kombinierten Hard- und verteilten Software-Komponenten handelt, war eine umfassende Spezifikation dieser Komponenten unabdingbar.

**SK34:**

Zum Schutz besonders gefährdeter Verkehrsteilnehmer (Radfahrer, Fußgänger) in Kreuzungsbereichen mit Lichtsignalanlagen wurde eine infrastrukturseitige Schutzeinrichtung konzipiert, die über drahtlose Kommunikation als auch Radarsensoren solche Gefahrensituationen erkennt und betroffene Verkehrsteilnehmer warnt. Alle erforderlichen Informationen werden zwischen Infrastruktur und kooperativen Endgeräten (bspw. Smartphones) ausgetauscht. Ziel des AP war die vollständige Hard- und Software-Spezifikation der Schutzeinrichtung, der kooperativen Schnittstellen zur Infrastruktur bzw. zu den Applikationen der Partner.

**SK35:**

Plötzlich auftretende Störungen im Kreuzungsumfeld wie bspw. Unfälle, Behinderungen durch Fahrzeuge und Gegenstände, Havarien, ungeplante Baustellen o. ä. können zu erheblichen Beeinträchtigungen des Verkehrsablaufes und wiederum selbst zu potenziell gefährlichen Unfallsituationen führen. Vorhandene, infrastrukturseitige Detektoren (Induktivschleifen, PIR-Sensoren) können solche Störungen nicht immer rechtzeitig und sicher erkennen. Hier setzt die geplante kooperative Schutzeinrichtung (intelligenter Leitkegel oder Sperreinrichtung) an. Sofort nach Aufstellen oder Aktivieren erfasst die Schutzeinrichtung ortsbezogene Informationen und stellt diese unmittelbar für andere Anwendungen (bspw. Mikroverkehrslage und lokales Routing, LSA-QM, Assistenzsysteme, Zentralen) bereit. Ziel des AP war die vollständige Spezifikation der Hard- und Software der Schutzeinrichtung, der Kommunikationsschnittstellen zur Infrastruktur bzw. zu den Applikationen der Partner.

**AP3000 – Implementierung**

In der Implementierungsphase wurden die im AP 2000 beschriebenen und spezifizierten Applikationen umgesetzt und in einen funktionsfähigen Zustand überführt. Ziele des AP waren zum einen der Aufbau einer modularen Schutzeinrichtung für besonders gefährdete Verkehrsteilnehmer, wie z. B. Radfahrer und Fußgänger, zum anderen die Entwicklung einer Kooperativen Schutzeinrichtung in Form eines Intelligenen Leitkegels für kurzfristige Sperrungen im Kreuzungsbereich.

Für beide Anwendungen musste, ausgehend von der System-Spezifikation, geeignete Hardware ausgesucht, kombiniert und zum Teil neu entwickelt werden, wie z. B. im Falle des Intelligenen Leitkegels.

Einen wesentlichen Kernpunkt der Entwicklungen stellte die zuverlässige Erfassung, Aufbereitung, Fusion und Übertragung aller für die bestimmungsgemäße Funktion notwendigen Daten und Informationen dar. Dazu gehören vor allem die Kommunikation und der Datenaustausch mit anderen Applikationen im Kreuzungsumfeld, hier insbesondere die RSU-basierten Anwendungen. Zu diesem Zwecke wurden neben der benötigten Hardware auch umfangreiche, verteilte Softwareanwendungen entwickelt und implementiert, mit denen der komplexe Funktionsumfang der beiden Applikationen vollständig abgebildet

werden konnte. Als Resultat der Implementierungsbemühungen standen die Applikationen Radfahrschutzeinrichtung und Kooperative Schutzeinrichtung für gemeinsame Tests im AP4000 in den jeweiligen Test- Demonstrationsfeldern zur Verfügung.

Zusammenfassend lagen die Schwerpunkte im Bereich Datenaustausch, -fusion und -interpretation, Umsetzung der Funktionen innerhalb der Applikationen, Auswahl geeigneter Hardware, Erstellung der Software sowie die Funktionsintegration in die Demonstratoren.

#### **SK34:**

Auf Grundlage der vollständigen System-Spezifikation der Radfahrer-Schutzeinrichtung wurde in diesem AP die Hardware aufgebaut und die dazu gehörige Software implementiert. Dazu zählen eine WLANp-fähige CCU in einem Demo-Fahrzeug, ein Smartphone für den Radfahrer, eine Datenbrille als alternative Warndarstellung für den Radfahrer sowie eine Road Side Unit. Zu letzterer zählt ein Radar, eine Application Unit zum Ausführen der infrastrukturseitigen RSE-Applikation, eine WLAN-Antenne sowie eine weitere WLANp-fähige CCU. Die in der RSU erfassten und aufbereiteten Daten werden bei Bedarf anderen Applikationen über die RSU bereitgestellt.

#### **SK35:**

In diesem AP wurde die kooperative Schutzeinrichtung gemäß der zuvor abgestimmten Hard- und Software-Spezifikation aufgebaut und prototypisch in Betrieb genommen. Im Mittelpunkt der Entwicklung stand die zuverlässige Erfassung, Aufbereitung, Fusion und Übertragung aller für die bestimmungsgemäße Funktion notwendigen Daten und Informationen. Dazu gehören vor allem die Kommunikation und der Datenaustausch mit anderen Applikationen im Kreuzungsumfeld, hier insbesondere die RSU-basierten Anwendungen (Mikroverkehrslage, lokales Routing und QM). Letztendlich war das Ziel des AP die Implementierung einer kooperativen Schutzeinrichtung, deren Funktionsweise und verkehrlichen Wirkungen im AP 4000 zusammen mit den anderen Kreuzungapplikationen demonstriert werden sollen.

### **AP4000 – Demonstration und Test**

Im Arbeitspaket Demonstration und Test wurden nun die zuvor entwickelten und implementierten Applikationen und Demonstratoren in umfassenden Tests auf ihre Funktion getestet. Ausgehend von individuellen Tests unter Laborbedingungen, die vornehmlich im Telematik-Testfeld- sowie im Galileo-Testfeld Magdeburg durchgeführt wurden, konnte in den anschließenden Integrationstests im Prüffeld Braunschweig das Zusammenspiel aller Applikationen im Teilprojekt in gemeinsamen, abgestimmten Tests erfolgreich durchgeführt werden.

Kernpunkte bei der Bearbeitung des AP waren neben den technischen Funktionstests der einzelnen Systemkomponenten vor allem die zuverlässige Kommunikation mit der Infrastruktur (hier RSU).

Die Ausarbeitung von Test- und Demonstrationsfällen sowie die konkrete Beschreibung der entsprechenden Testaufbauten und Demonstratoren waren ebenso Gegenstand des Arbeitspaketes, wie die Protokollierung und Dokumentation der erzielten Ergebnisse, welche auch für dieses Arbeitspaket in einem entsprechenden Meilensteinbericht mündeten.

Die Demonstratoren wurden in umfassenden Tests auf ihre Funktion getestet. Dazu waren individuelle Testreihen der Partner ebenso erforderlich, wie größere, gemeinsam abgestimmte und durchgeführte Tests des Zusammenspiels aller Applikationen im Teilprojekt. Dazu war es zunächst erforderlich, den Testaufbau und eine Reihe von Testszenarien festzulegen. Im letzten Schritt erfolgten die Ausarbeitung von Demonstrationsfällen und die Präsentation der erarbeiteten Ergebnisse in Form von Stand- und Fahrdemonstrationen.

Für die Funktionstests wurden eine gemeinsame Konkretisierung der Testaufbauten, die Beschreibung der Versuchsszenarien und eine endgültige Lokalisierung der Tests im Prüffeld Braunschweig sowie im Testfeld Düsseldorf vorgesehen. Anschließend erfolgten die Durchführung der technischen Funktionstests und die Protokollierung der Erkenntnisse. Die erste Phase der Tests erfolgte dabei unter Nutzung der Vorarbeiten des AIM-Testfelds im Prüffeld Braunschweig. Die zweite Phase der Tests und die Abschlussdemonstration erfolgten im Testfeld Düsseldorf.

Für die abschließenden Demonstrationen und Präsentationen der Ergebnisse wurden entsprechende Demonstrationsfälle erarbeitet, die die Projektergebnisse und das Zusammenspiel aller Applikationen in angemessener Form wiedergeben.

**SK34:**

Um eine reibungslose und wirkungsvolle Funktion der Radfahrer-Schutzeinrichtung sicherstellen zu können, wurden im Anschluss an die Entwicklung und erste Inbetriebnahme unter Laborbedingungen (AP3340, Prüffeld Braunschweig) alle Funktionen getestet und die verkehrlichen Wirkungen unter weitgehend realen Bedingungen im Testfeld Düsseldorf ermittelt. Dazu wurden in Abstimmung mit den TF-Verantwortlichen ausgewählte Knotenpunkte zur Erprobung und Demonstration des Systems ausgerüstet. Nach erfolgreicher Durchführung von applikationsspezifischen Einzeltests wurde auch das Zusammenspiel aller involvierten Partnerapplikationen in einer Reihe von Testszenarien untersucht.

**SK35:**

Die geplante Schutzeinrichtung kann ihre potenzielle Wirkung nur dann voll entfalten, wenn das Zusammenspiel mit den anderen Applikationen im Kreuzungsbereich sowie mit evtl. nachgeschalteten Zentralen (VRZ, Meldestellen usw.) reibungslos funktioniert. Dazu war neben den technischen Funktionstest der einzelnen Systemkomponenten vor allem die zuverlässige Kommunikation mit der Infrastruktur (hier RSU) erforderlich. Die Untersuchungen wurden durch Verwendung einer Kombination von realen Systemkomponenten und simulierten Verkehrsszenarien (Devices in the Loop) für den geplanten Versuchsaufbau unterstützt. Auf diese Weise konnten auch die erwarteten

verkehrlichen Wirkungen effizienter abgeschätzt und durch praktische Untersuchungen untermauert werden.

### **AP5000 – Bewertung**

Die letzte Projektphase im Teilprojekt SK stellte die Evaluierung und Bewertung der entwickelten und getesteten Applikationen dar.

Hierbei wurde für beide Applikationen eine technische Bewertung durchgeführt. Obwohl die in SK vom ifak entwickelten Applikationen keine direkte verkehrliche Wirkung haben, wurde auch eine Bewertung hinsichtlich der verkehrlichen Wirkung vorgenommen, da sowohl für die Radfahrschutzeinrichtung als auch für die Kooperative Schutzeinrichtung eine indirekte verkehrliche Wirkung angenommen und nachgewiesen werden konnte. Die Bewertung hinsichtlich der verkehrlichen Wirkung wurde hierbei durch umfangreiche simulative Untersuchungen vorgenommen. Der Bewertung der Applikationen SK-34 und SK35 lagen im Antrag die AP-Nummern 5340 und 5350 zugrunde. Als Ergebnis dieser AP lagen neben einer ausführlichen technischen Bewertung auch eine verkehrliche Bewertung für zuvor abgestimmte Szenarien (verschiedene Ausstattungs- und Befolungsgrade sowie Verkehrssituationen) vor, welche im Meilensteinbericht 4 zusammengefasst wurden.

### **1.4.2 Planung und Ablauf im Teilprojekt KI**

Die Einbettung des Teilprojektes Kooperative Infrastruktur in UR:BAN VV wird in Abbildung 3 verdeutlicht. Ausgehend von Entwicklungen in den Teilprojekten "Regionales Netz", "Urbane Straßen" und "Smarte Kreuzung" sollte ein effizientes Test- und Prüffeldmanagement etabliert werden, das die Grundlage für die verkehrliche Bewertung darstellen sollte.

Ausgehend von der betrieblichen Bewertung und den Spezifikationen (zum Teil auch aus den anderen Teilprojekten) wurde ein Leitfaden für die Einführung kooperativer Systemverbände auf kommunaler Ebene erstellt.

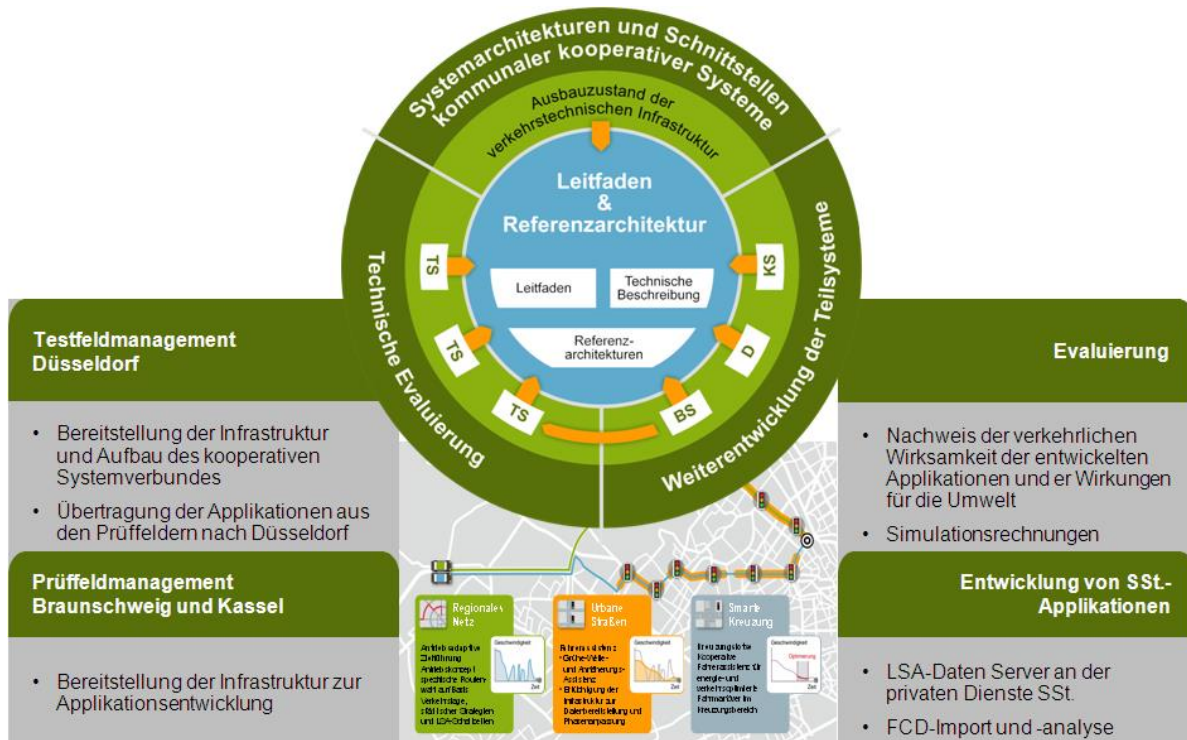


Abbildung 3: Einbettung des TP „Kooperative Infrastruktur“ in UR:BAN-VV

Die wichtigsten Arbeitsziele im Teilprojekt Kooperative Infrastruktur waren:

- (1) Analyse des Ausbauszustandes der verkehrstelematischen Infrastruktur
- (2) Spezifikation der in URBAN VV entwickelten infrastruktureseitigen Applikationen
- (3) Etablierung eines effektiven und zielgerichteten Test- und Prüffeldmanagements
- (4) Verkehrliche, Technische und Betriebliche Bewertung der im Projekt Vernetztes Verkehrssystem entwickelten Systeme
- (5) Entwicklung eines tragfähigen und praxisnahen Testkonzepts für kooperative Systeme und Applikationen
- (6) Erstellung eines Leitfadens für die Einführung kooperativer Systeme bei kommunalen und regionalen Verwaltungen

Diese Ziele sollten innerhalb der in Abbildung 4 dargestellten Arbeitspakete erreicht werden.

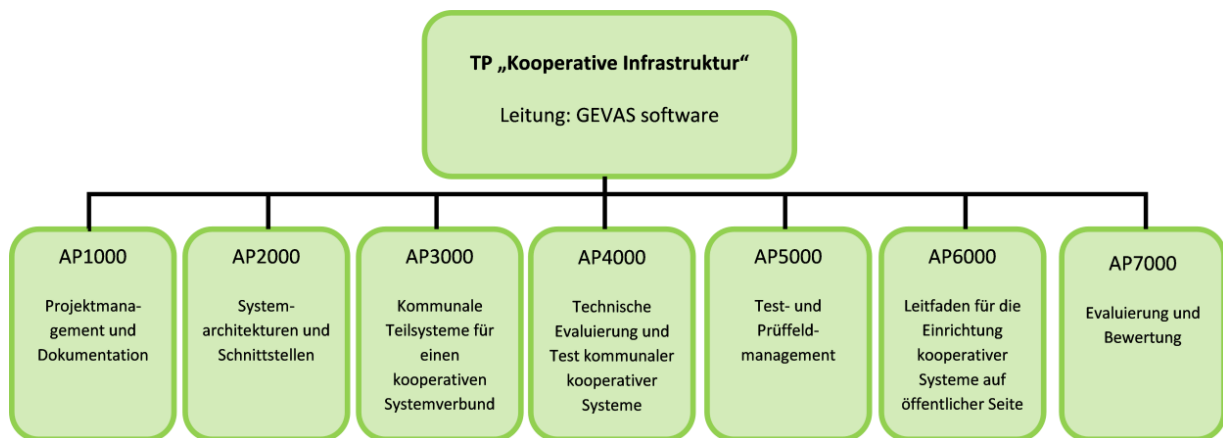


Abbildung 4: Projektstruktur „Kooperative Infrastruktur“

In AP1000 erfolgte das Projektmanagement.

In AP2000 fand die Analyse des Ausbauzustandes der verkehrstelematischen Infrastruktur unter dem Fokus der Einführung kooperativer Systeme statt. Diese Betrachtungen stellten die Grundlage für die Erarbeitung der Systemarchitekturen kommunaler kooperativer Systeme dar.

In AP3000 erfolgte in enger Abstimmung mit den verkehrlichen Teilprojekten die Spezifikation der in UR:BAN-VV entwickelten infrastrukturseitigen Applikationen. Ausgesuchte Applikationen wurden unter Berücksichtigung der konzipierten Referenzarchitektur entwickelt.

In AP4000 wurden Konzepte und Werkzeuge für den systematischen und umfassenden Test kooperativer Systeme und Applikationen spezifiziert und umgesetzt. Daneben wurde in diesem AP auch ein Testleitfaden für die Einführung und Qualitätssicherung kooperativer Systeme und Applikationen entwickelt.

In AP5000 erfolgte die Koordination der Test- und Prüffelder. Diese Koordination diente zur Abstimmung zwischen den Prüffeldern Kassel und Braunschweig mit dem Testfeld Düsseldorf während der Entwicklungsphase. Dieser Arbeitskomplex sah ein abgestimmtes Demonstrations-, Erhebungs- und Bewertungsmanagement auf der Seite der kommunalen Partner vor.

In AP6000 wurde ein Leitfaden für die Einführung kooperativer Systeme bei kommunalen und regionalen Verwaltungen erarbeitet.

In AP7000 fand die verkehrliche Bewertung der im Projekt Vernetztes Verkehrssystem entwickelten Systeme statt. Hierbei wurde in Ergänzung zu den anderen Teilprojekten das Zusammenspiel der Applikationen betrachtet und deren verkehrliche wie energetische Auswirkungen auf das Testfeld Düsseldorf hochgerechnet.

Das ifak war hauptsächlich in den AP 4000 (Technische Evaluierung und Test kommunaler kooperativer Systeme) aktiv. Daneben gab es Zuarbeiten zu den Inhalten der Arbeitspakete 2220 (Bestehende Standards und Datenmodell), 2400 (Vorgaben aus dem ITS Action Plan und weiteren ITS Aktivitäten), 2600 (Erarbeitung von Referenzarchitekturen), 3100

(Spezifikation der kommunalen Teilsysteme), 3400 (Systemerweiterungen bezüglich Übertragbarkeit), 5100 (Prüffeldmanagement Braunschweig), 5330 (Laufende Betriebsuntersuchungen) und 6300 (Diskussion des Leitfadens in den Gremien).

## 1.5 Stand der Wissenschaft und Technik

Wichtige Technologien und Standards, die sich als Grundlage der Arbeiten und Ergebnisse des ifak innerhalb von UR:BAN VV ergaben, werden im Folgenden dargestellt:

### MDM:

Anbieter von Mobilitätsdiensten haben ein hohes Interesse an einer einfachen Verfügbarkeit und einem zentralen Zugriff der überwiegend heterogen vorliegenden Verkehrsinformationen. Der von der Bundesanstalt für Straßenwesen betriebene Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM) [1] – ein vom damaligen BMVBS gefördertes Forschungsprojekt – soll Zugang und Verfügbarkeit von aktuellen Verkehrsdaten und Verkehrsinformationen vereinfachen und verbessern und dadurch neue Anwendungsfelder auf dem Gebiet mobiler Informations- und Serviceleistungen erschließen. Die Möglichkeit eines einheitlichen und standardisierten Zugriffs auf Verkehrsdaten aller Art sowie deren einfache Verknüpfbarkeit eröffnet hierbei die Chancen für das Angebot einer Vielzahl neuartiger, intelligenter Mobilitätsdienstleistungen.

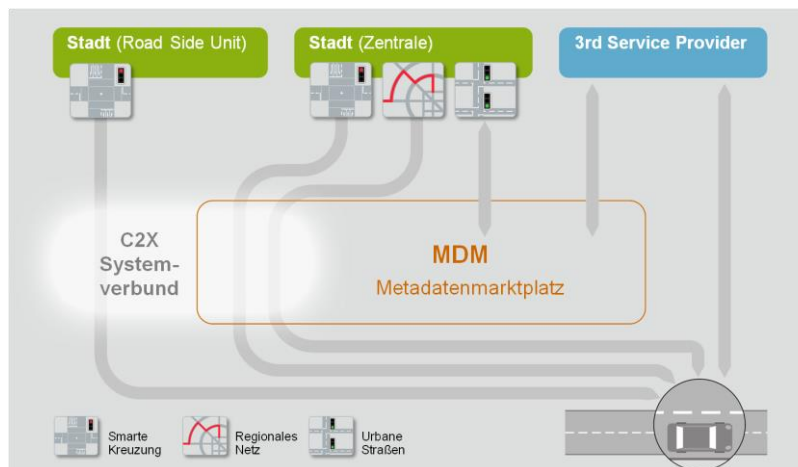


Abbildung 5: Verwendung des MDM in UR:BAN VV

Viele Applikationen, die in UR:BAN entstanden, verwenden den MDM als standardisierte Datenplattform (siehe Abbildung 5). Auch die vom ifak im Teilprojekt SK entwickelte Applikation KSE nutzt den MDM, um ihre Daten für die weitere Verwendung standardisiert bereitzustellen.

### DATEXII:

Von entscheidender Bedeutung bei der Realisierung des Ansatzes eines zentralen Datenmarktplatzes ist dabei die Verwendung eines standardisierten Datenzugriffs. Beim MDM als zentrale Plattform für den Austausch von Verkehrsinformationen, so auch der KSE-Informationen, kommt aus diesem Grund der EU-weite Standard DATEX II [2], einem



dezidierten und beliebig erweiterbaren standardisierten Schnittstellenkonzept für verkehrsrelevante Daten, zum Einsatz, welcher die Abbildung einer Vielzahl von Verkehrsdaten beinhaltet.

Aus diesem Grund wurde bei der Realisierung der Kooperativen Schutzeinrichtung (KSE) auf diesen Standard zurückgegriffen

#### **RTKLIB:**

Geeignete Technologien zur Kommunikation und Positionsbestimmung existieren bereits oder werden stetig weiterentwickelt. Die technologische Herausforderung bei der Entwicklung der Kooperativen Schutzeinrichtung bestand vor allem in der fahrstreifengenauen Ortsbestimmung im Verkehrsraum, was eine hochgenaue Lokalisierung erfordert. Hierzu wurden unter anderem verschiedene Verfahren, wie das Precision Point Positioning (PPP) oder auch das Differential GNSS (DGNSS), hinsichtlich ihrer Eignung evaluiert und eingehend untersucht. Unterstützt wurden die Entwicklungsarbeiten durch die Verwendung einer freien Software-Bibliothek rtklib [3], die für die Implementierung herangezogen und für die entsprechende Systemausprägung, wie der verwendete Low-Cost-Hardware angepasst wurde.

#### **Car2X bzw. V2X auf Basis von WLANp:**

Ein weiteres Element im Teilprojekt „Smarte Kreuzung“ als auch im TP „Kooperative Infrastruktur“ war die Car2Car- sowie die direkte Car2Infrastruktur-Kommunikation. In 2010 wurde mit IEEE 802.11p ein Standard publiziert, der WLAN-Technik (802.11) für den Verkehrsbereich adaptiert. Mit WLANp soll Fahrzeug-zu-Fahrzeug- (Car2Car bzw. Vehicle2Vehicle) als auch Fahrzeug-zu-Infrastruktur (Car2I)-Kommunikation realisiert werden. Vorteile sind hohe Datenraten bei relativ niedrigen Antwortzeiten und die Möglichkeit, direkt (z. B. per Broadcast) zwischen Teilnehmern Daten auszutauschen. Dies erfordert im Gegensatz zu Mobilfunk keine weiteren Basisstationen, die Funkzellen bereitstellen. Außerdem erfolgt derzeit in mehreren Regionen der Erde eine Reservierung des Frequenzbereiches (5,9 GHz) für die Domäne der intelligenten Verkehrssysteme, sodass zeitkritische Car2X-Anwendungen die Bandbreite nicht mit anderen Anwendungen teilen müssen, z. B. dem WLAN von Handys oder Hot Spots in Städten.

Die europäischen Car2X-Dienste befanden sich zur Zeit des Projektbeginns bei ETSI und CEN noch in der Standardisierung. Aus diesem Grund wurde in einer partnerübergreifenden Sitzung vom 16.04.2012 beschlossen, auf die im SimTD-Projekt spezifizierten 802.11p-Kommunikationsprotokolle in der Version „öffentliches Deliverable D21.4“ [4] zurückzugreifen. Aufgrund der Anfrage des UR:BAN-Steuerkreises beim SimTD-Konsortium wurden dem UR:BAN-Konsortium Nutzungsrechte am SimTD-Stack zugesichert.

#### **SUMO:**

Das DLR entwickelte mit „Simulation of Urban Mobility“ (SUMO) ein freies Programm zur Durchführung von Verkehrssimulationen. Es besitzt zwar bereits von Haus aus eine grafische Oberfläche, kann aber auch ohne GUI parametrisiert und ausgeführt werden, um die Ergebnisse über eine XML-Datei zu erhalten.

SUMO kam zum einen im Teilprojekt KI zum Einsatz: Über den vom ifak entwickelten Testmanager wird es parametrisiert und ausgeführt. Die entstandene XML-Datei enthält Bewegungsdaten von Verkehrsteilnehmern (KFZ, LKW, Radfahrer...) für jeden Zeitschritt. Zu jedem Datum wird ein entsprechendes Datenpaket für eine Funkschnittstelle erzeugt. Dadurch entstehen aus einer Simulation reale Testdaten für die Car2X- und WLAN-Schnittstelle zur Stimulation von Testobjekten.

Des Weiteren wurde SUMO im AP5000 (Bewertung) des Teilprojektes SK genutzt, um die verkehrliche Wirkung der Radfahrer-Schutzeinrichtung als auch der Kooperativen Schutzeinrichtung abzuschätzen.

#### **TPEG:**

Ein weiterer Standard, auf dem bei der Realisierung der Kooperativen Schutzeinrichtung aufgebaut wurde, war der TPEG-Standard [5]. Er fand Anwendung bei der Informationsübermittlung zurück an die Fahrzeuge per Car2X-Kommunikationstechnologie 802.11p. Hier wurden bei der Spezifikation der Datenelemente, in der für die Kooperativen Schutzeinrichtung verwendeten DEN-Nachricht, auf den TPEG-Standard zurückgegriffen.

#### **TTCN-3:**

Im Verkehrsbereich existieren nun schon seit einigen Jahren Bemühungen für offene, auf Standards basierende Systemarchitekturen. Mit offenen, standard-basierten Systemarchitekturen wurden die Grundlagen für verteilte, miteinander kooperierende Applikationen gelegt. Allerdings müssen diese während der Entwicklung und insb. zur Inbetriebnahme ausgiebig getestet werden, um die korrekte Funktion und das Einhalten wichtiger (Zeit-)Randbedingungen nachzuweisen. Der Test und die Evaluierung verteilter, kooperativer Verkehrssysteme sind mit sehr hohem Aufwand verbunden. Der hohe Aufwand resultiert im Wesentlichen aus der hohen Komplexität dieser örtlich verteilten Systeme.

Mit dem Teststandard Testing and Test Control Notation (TTCN-3 [6]) steht ein standardisiertes Konzept zur Verfügung, das auch den Test von örtlich verteilten Systemen adressiert. Neben der Notation ist insb. auch die Testruntime auf Spezifikationslevel in den Standarddokumenten von TTCN-3 standardisiert und ausführlich beschrieben. Diese Konzepte wurden in UR:BAN VV, Teilprojekt KI verwendet, um auf dieser Basis Testmethoden und Testsysteme für kooperative Systeme und verteilte Applikationen im Verkehrsbereich entwickeln zu können.

### **1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Für das Forschungsvorhaben UR:BAN konnte das ifak auf in zahlreichen vorangegangenen Forschungsprojekten (bspw. Dmotion, INVENT, AKTIV) aufgebaute Kontakte zu Dritten zurückgreifen. Insbesondere die enge Kooperation mit der Landeshauptstadt Magdeburg erwies sich als zielführend und nützlich für die Erreichung der Ziele im Vorhaben.

Für die Entwicklung und Erprobung von Komponenten, Systemen und Applikationen konnte das Institut ifak daneben gewachsene technische und organisatorische Infrastrukturen in Sachsen/Anhalt zurückgreifen. So ist seit 2005 im Rahmen der Initiative „Angewandte Verkehrsforschung / Galileo Transport Sachsen-Anhalt“ ein weiträumiges landesweites Testfeld entstanden, in dem neue Dienstleistungen und Produkte für Ortung, Navigation und Kommunikation in den Bereichen Verkehr (Straße und Schiene) und Logistik entwickelt und umgesetzt werden.

Hierzu kooperieren Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus der Region mit Unterstützung der Landespolitik mit nationalen und europäischen Partnern. Im Galileo-Testfeld konnten grundlegende Komponenten und Systeme der ifak-Inhalte aus dem Teilprojekt SK (Kooperative Schutzeinrichtung, Radfahrerschutzeinrichtung) ausgiebig erprobt und getestet werden, was die Entwicklung dieser Projektinhalte wesentlich begünstigt hat.

## 2 Radfahrer-Schutzeinrichtung – RSE

Eine der durch das ifak im Forschungsumfeld Smarte Kreuzung entwickelten Applikationen ist die *Radfahrer-Schutzeinrichtung* (RSE bzw. SK-34). Sie leistet in erster Linie einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit an Verkehrsknotenpunkten. Darüber hinaus zeichnet sie sich dadurch aus, dass sie eine starke Verflechtung mit anderen, sowohl fahrzeugeitigen als auch infrastrukturseitigen Anwendungen der Smarten Kreuzung aufweist und für solche Anwendungen wichtige Daten bereitstellen. Nachfolgend wird dieses Teilprojekt samt erzielten Ergebnissen vorgestellt.

### 2.1 Motivation, Konzept und Arbeitsschwerpunkte

Gerade an unübersichtlichen oder verkehrlich komplexen Kreuzungen sind Verkehrsteilnehmer trotz Signalisierung bei Abbiegevorgängen oder Querungen oft überfordert, was zu potenziell gefährlichen Situationen führen kann. Abbildung 6 zeigt den Fall, wie ein rechtsabbiegendes Fahrzeug einen Radfahrer gefährdet, der ebenfalls die Kreuzung überqueren will. Zum Schutz solcher besonders gefährdeter Verkehrsteilnehmer (Radfahrer, Fußgänger) im Kreuzungsbereich wurde eine infrastrukturseitige Schutzeinrichtung konzipiert und umgesetzt, die auf geeignete Weise vor diesen Gefahrensituationen warnt. Ihr Name wurde vereinfachend als *Radfahrer-Schutzeinrichtung* (RSE) gewählt.



Abbildung 6: Rechtsabbiegendes KFZ gefährdet Radfahrer und durch Schutzeinrichtung angedachte Lösung

Alle erforderlichen Informationen, wie Position und Richtung von Fahrzeugen und Radfahrern, werden von der Infrastruktur-Einrichtung gesammelt. Dazu dient die Funkkommunikation mit Car2X-fähigen KFZ als auch kooperativen Endgeräten wie Smartphones. Um auch Verkehrsteilnehmer ohne solche Kommunikationsmöglichkeiten zu erfassen bzw. die Detektionswahrscheinlichkeit zu erhöhen, wurden Radarsensoren in den Systemverbund integriert. Nach Berechnung von Trajektorien und Vorhersage möglicher Konfliktsituationen werden die betroffenen Verkehrsteilnehmer über die Funkschnittstellen und entsprechende Maßnahmen (z. B. Darstellung auf Smartphone-Display) gewarnt.

Damit hat die Radfahrer-Schutzeinrichtung vorrangig das Ziel, die Sicherheit von Verkehrsteilnehmern in Kreuzungsbereichen zu erhöhen. Es sollen Unfälle vermieden werden, bei denen beispielsweise Radfahrer durch Vergessen des Schulterblicks übersehen

werden. Darüber hinaus sorgt die frühzeitige Information über eine potentielle Gefährdung ggf. dafür, dass KFZ nicht erst im Kreuzungsbereich plötzlich abbremsten, sondern bereits vorher ihre Geschwindigkeit kontrollierter anpassen, um den oder die schwachen Verkehrsteilnehmer passieren zu lassen.

Zur Umsetzung dieses Ziels wurden zusammenfassend folgende Arbeits-Schwerpunkte definiert:

- Finden passender Anwendungsfälle samt Identifizierung möglicher Konfliktpunkte zwischen KFZ und Radfahrern bei entsprechender Schaltung der vorhandenen Lichtsignalanlagen, konkret für die Zufahrten in den Testfeldern Braunschweig und Düsseldorf
- Spezifikation von benötigter Hardware (auf Seiten der KFZ, Radfahrer als auch der Infrastruktur) inklusive Zusammenarbeit mit anderen Partnern im TP SK
- Identifizierung der erforderlichen Kommunikationsabläufe (zwischen KFZ und RSU bzw. Radfahrern und RSU) und entsprechender Schnittstellen
- Definition der zu übertragenden und auszuwertenden Daten
- Umsetzung eines Algorithmus zur Erkennung von potentiellen Konflikten
- Umsetzung/Implementierung aller Hard- und Softwarekomponenten
- Erprobung am ifak sowie in den Testfeldern
- Planung der Abschlusspräsentation auf dem Parkplatz des Messegeländes Düsseldorf sowie Durchführung entsprechender Fahrdemonstrationen

## 2.2 Integration von schwachen Verkehrsteilnehmern über Smartphones

Für schwache, nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer ist die WLANp-Technologie noch nicht ausgelegt. Es besteht noch kein standardisiertes Verfahren, diese Verkehrsteilnehmer in kooperative ITS einzubinden. Daher wurden Methoden untersucht, für die eine hohe Durchdringung wahrscheinlich ist. Dies ist seit ein paar Jahren bei Smartphones der Fall: Fast jeder Deutsche besitzt eines und viele tragen es bei sich. Über App-Stores können Applikationen zentral an Nutzer verteilt werden. Daher wurde davon ausgegangen, dass ein schwacher Verkehrsteilnehmer, der seine Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen will, dazu bereit ist, eine entsprechende Schutz-Applikation auf dem bereits vorhandenen Smartphone zu installieren und somit aktiv Daten mit dem Verkehrssystem auszutauschen. Natürlich gibt es andere Lösungen, wie ein intelligenter Fahrradhelm, der mit Volvo-Fahrzeugen kommunizieren kann. Solchen Lösungen wird jedoch eine geringere wahrscheinliche Ausstattungsrate zugerechnet, als der gewählten Smartphone-Variante. Prinzipiell lässt sich die Idee auf jegliche Smart Devices übertragen, die über Funk mit der Außenwelt kommunizieren können. Der Nutzer soll entscheiden, mit welchem privaten Gerät er sich einbringt, das nicht erst für die Schutzeinrichtung angeschafft werden muss.

Der exemplarische Anwendungsfall für die RSE ist der, in dem ein Radfahrer sein Smartphone am Lenker befestigt hat. Die dort installierte RSE-App sammelt anonyme Bewegungsdaten, sendet sie zu Road Side Units an ausgestatteten Kreuzungen und stellt ggf. Warnungen vor demnächst kreuzenden KFZ dar. Als Funkschnittstelle wurde WLAN gewählt: Die Road Side Unit muss hierfür einen Access Point bereitstellen. SSID und Passwort müssen im Smartphone einmalig hinterlegt werden. Nähert sich ein Nutzer einer mit der RSE

ausgestatteten Kreuzung, so erfolgt die automatische Anmeldung im bereitgestellten WLAN-Netz. Alternativ wäre auch Mobilfunk möglich gewesen. Dies würden viele Nutzer aber aufgrund des zusätzlichen Datenverbrauches ablehnen, da in Deutschland noch keine Daten-Flat-Tarife üblich sind. Außerdem war ein WLAN-Access Point für den Demonstrator leichter zu realisieren als ein Mobilfunkmodul mit extra SIM-Karte.

Zur Entwicklung und Demonstration der Smartphone-App wurden verschiedene Android-Geräte benutzt. Android-Apps werden nativ in Java geschrieben. Mittels Qt-Framework wurde jedoch eine App in C++ und QML erstellt, die für beliebige Systeme übersetzt werden kann. Darunter sind auch Android, iOS und Windows Phone. Abbildung 7 zeigt die verschiedenen Tool-Ketten.

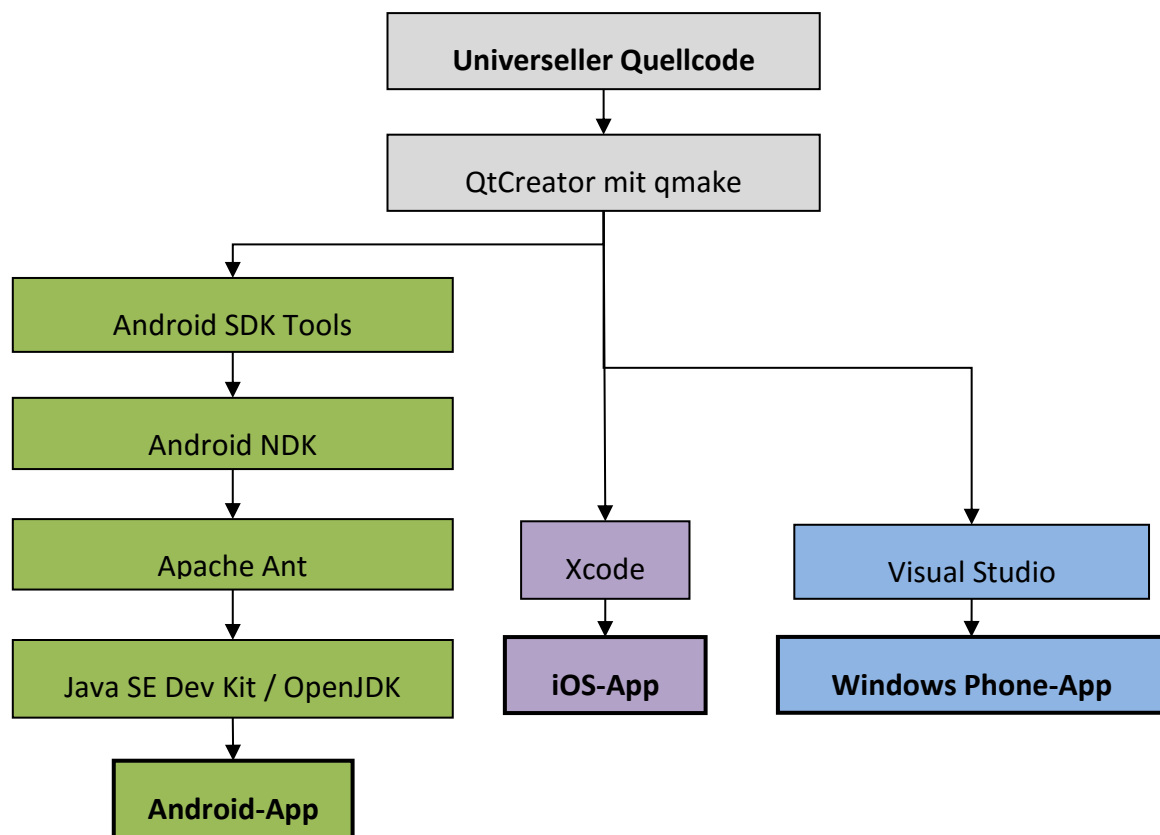


Abbildung 7: Tool-Ketten, um Qt-App für verschiedene mobile Plattformen zu entwickeln

An dieser Stelle sei bereits vorweggegriffen, dass im Fahrzeug auch eine Visualisierung der Warnung geschehen musste. Es wurde die Lösung gewählt, hier dieselbe RSE-Handyapp wie für schwache Verkehrsteilnehmer (VRUs) zu verwenden, da viele Elemente dieselben sind. So wählt der Nutzer zu Beginn seine „Rolle“: KFZ oder VRU. Falls noch nicht geschehen, so ist die IP-Adresse der Basisstation zu hinterlegen. Im KFZ wird ein zusätzlicher WLAN-Access Point erzeugt, der mit dem WLANp-Modul verbunden ist. Dieser Access Point ist die Basisstation für die mobile App im KFZ. Für den VRU ist dies dagegen die RSU. Für die Demonstrationen innerhalb SK34 wurden immer dieselbe RSU und IP benutzt. In einer Weiterentwicklung für mehrere RSUs einer Stadt wäre eine Liste vordefinierter Adressen

denkbar, die im Gerät hinterlegt ist oder von einem Server abgerufen werden könnte. Für eine gute Usability sollten die App verfügbare Basisstationen automatisch suchen.

Abgesehen vom Auswählen der Rolle und dem Festlegen der Adresse der Basisstation ist keine weitere Nutzereingabe erforderlich. Schließlich darf der Nutzer im Straßenverkehr so wenig wie möglich zusätzlich abgelenkt werden. So gibt die RSE-App auch keine weiteren Informationen aus, wie aktuelle Geschwindigkeit oder eine Karte der Umgebung, da diese vom Verkehrsgeschehen ablenken könnten. Erst beim Erhalten einer Warnung wird diese über eine dezente Animation und einen Warnton signalisiert. Ein Beispiel ist in Abbildung 8 zu sehen.

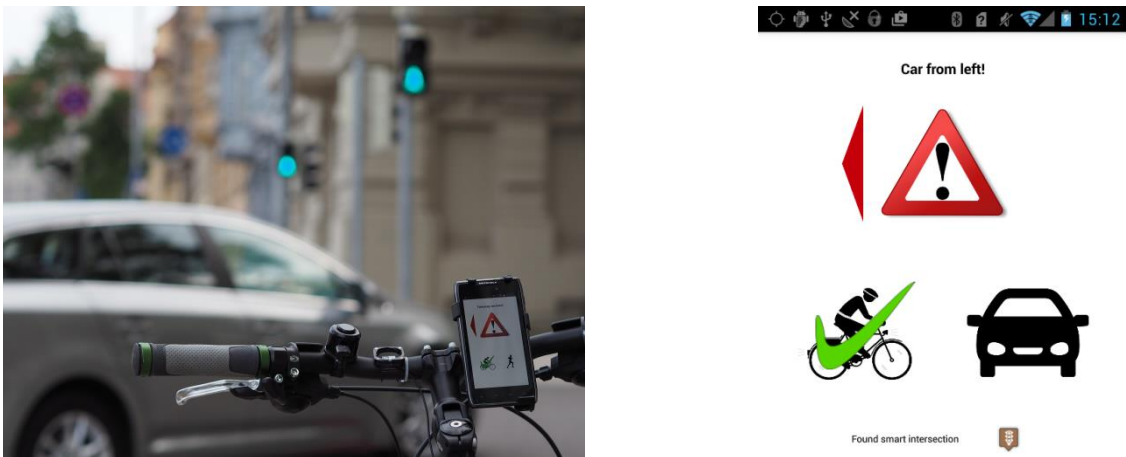


Abbildung 8: Am Fahrradlenker befestigtes Smartphone warnt vor schneidendem Fahrzeug

Zur Sammlung von Daten und dem Empfangen von Warnungen wurde ein proprietäres Datenformat spezifiziert. Es verwendet die Nutzerdaten des UDP-Protokolls. Folgende Zustandsdaten wurden gewählt, um der RSU eine Abschätzung der Trajektorien zu ermöglichen:

- Nachrichtentyp (reserviert für Status, Warnung, Warnungsnegation, Ping)
- Geografische Länge und Breite im WGS-84-Koordinatensystem
- Geschwindigkeit
- Längsbeschleunigung
- Richtung
- Zeitstempel (Unixzeit: Sekunden seit 1.1.1970)

Für die Warnungs-Nachricht von einer RSU zu einem Smartphone wurde folgende Struktur definiert:

- Nachrichtentyp (siehe oben)
- ID, damit einem Ereignis und somit einer Negation zuordenbar ist
- Ursache: causeCode nach TPEG-TEC-Tabelle (V3.0), wie er auch in standardisierten WLANp-DENMs verwendet wird
- Geografische Länge und Breite im WGS-84-Koordinatensystem
- Entfernung
- Richtung

- Gefahrenlevel (nach TPEG-Tabelle tec003)
- Zeitstempel

Dabei wurde darauf geachtet, keine Fließkommazahlen, sondern nur ganze Zahlen zu übertragen. Die Werte für Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung wurden dafür skaliert. Der Nachrichten-Empfänger kann sie mit derselben Skalierung wieder umrechnen. Dadurch werden Bytes (zur Angabe der Kommastelle) im Datenpaket gespart.

Die Ortsangabe wird hauptsächlich per GNSS, also Satellitenempfänger erhalten. Das Signal kann relativ stark verrauscht sein, weshalb es mit einem Tiefpassfilter zunächst geglättet wird. Für Fußgänger wurde zudem ein Schrittzähler entwickelt. Über eine Fast Fourier-Transformation (FFT) wird aus den Schwingungen des Beschleunigungssensors die Schrittfrequenz ermittelt. Abbildung 9 zeigt, wie hierfür aus den Beschleunigungswechseln eine periodische Funktion ermittelt wird. Dies ist eine Alternative zu Verfahren, die lediglich das Überschreiten von Schwellwerten ermitteln, um einen Rückschluss auf einen Schrittwechsel abzuschätzen. Durch Kenntnis der Schrittweite lässt sich nun die Gehgeschwindigkeit errechnen. Über eine Sensorfusion lassen sich die Werte von Schrittzähler und GNSS kombinieren, um die GNSS-Geschwindigkeit zu verbessern. Für diese Sensorfusion existieren jedoch auch wieder verschiedene Lösungsansätze. Deren Untersuchung, Implementierung und Evaluierung hätte zu viel Zeit beansprucht. Für die Schutzeinrichtung von SK34 wurde das Thema daher nur grundlegend untersucht, die Ergebnisse können in Anschlussprojekten oder Forschungen weiter verfolgt werden.

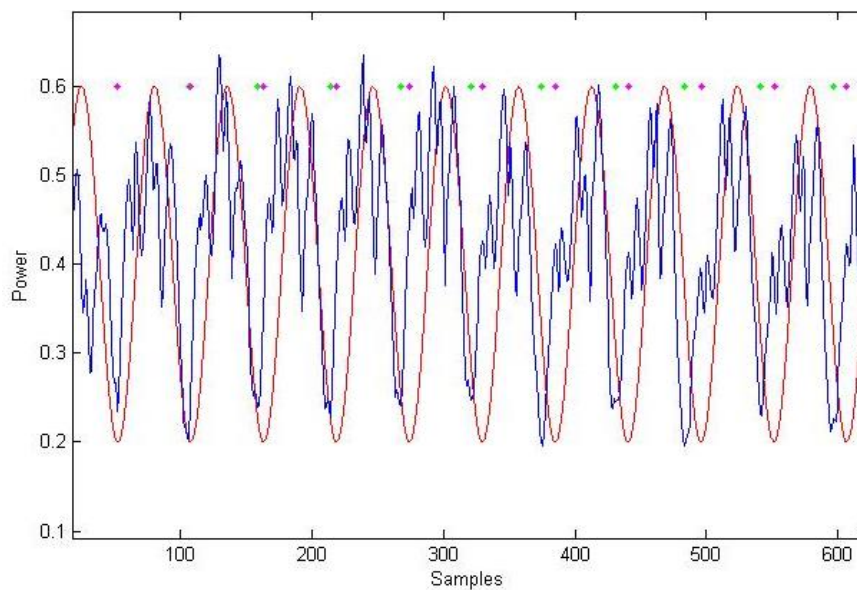


Abbildung 9: Bewegung vom Smartphone-Beschleunigungssensor (blau) und extrahierte Sinusfunktion (rot) zur Schrittzahl- und damit Geschwindigkeitsmessung von Fußgängern

### 2.3 Integration von Fahrzeugen über WLANp

Zur Integration von Fahrzeugen in das kooperative Verkehrssystem wurde davon ausgegangen, dass diese mit WLANp-Funkeinheiten (WLANp-CCUs) ausgerüstet sind. Es ist vorgesehen, dass WLANp-fähige Fahrzeuge regulär und zyklisch Statusnachrichten



versenden, voraussichtlich zwischen 1 und 10 Hz. Das hierfür standardisierte Nachrichtenformat lautet Cooperative Awareness Message (CAM). Für nicht-zyklische Ereignisse wie Warnungen wurde hingegen ein anderes Format spezifiziert: Die Decentralized Environmental Notification Message (DENM). Darüber hinaus existieren Car2X-Nachrichtentypen, die Informationen über Lichtsignalanlagen (SPaT) oder die Kreuzungs-Topologie (MAP/TOPO) enthalten. Sie spielen für die Radfahrer-Schutzeinrichtung jedoch keine Rolle. CAM und DENM werden durch die ETSI spezifiziert. Die aktuellen Versionen stammen vom November 2014. Die Planungen für die UR:BAN SK-Projekte begannen jedoch schon vorher. Daher einigten sich die beteiligten Projektpartner, eine bestimmte Version für die gesamte Projektlaufzeit zu verwenden. Diese fand man in der Version, die für das Car2X-Projekt SimTD (Sichere intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland) genutzt und bereits ausgiebig getestet wurde.

Die Nutzdaten einer Fahrzeug-CAM nach SimTD-Spezifikation sind folgendermaßen aufgebaut: Wie alle anderen Car2X-Nachrichtentypen beginnt die CAM mit dem *C2XAppPayload*-Teil. Er enthält grundlegende Parameter wie die actionID als einzigartigen Situations-Identifikator oder den Zeitstempel der Nachrichtenerstellung. Darauf folgt der *CoopAwareness*-Teil, der für die CAM spezifische Parameter enthält. Dies sind lediglich die stationCharacteristics mit booleschen Werten, die zum Beispiel darüber eine Aussage treffen, ob die CAM von einem mobilen Sender stammt. Zuletzt ist eine Liste aus TaggedValues möglich. Unter anderem lässt sich hier die Fahrzeug-Geschwindigkeit oder ein gesetzter Blinker angeben. Das verwendete Profil (ITS station profile [7]) bestimmt, welche Parameter letztendlich Pflicht und welche obligatorisch sind. Für private Fahrzeuge soll das Profil *basicVehicle* genutzt werden. Die Profile *emergencyVehicle* (z. B. für Polizeifahrzeuge) und *publicTransportVehicle* (z. B. Busse) beinhalten die Pflichtparameter des *basicVehicle* und verlangen noch einige mehr. Daher kann für die Radfahrer-Schutzeinrichtung davon ausgegangen werden, dass folgende Pflichtparameter von mit WLANp ausgerüsteten Fahrzeugen übertragen werden:

- vehicleSpeed: Fahrzeug-Geschwindigkeit
- heading: Bewegungsrichtung
- longAcceleration: Längsbeschleunigung
- exteriorLights: Ob und welche Lichter (Abblendlicht etc., aber auch gesetzter Blinker) aktiv sind

Car2X-Nachrichten werden generell als Broadcast versendet. Die von Fahrzeugen versendeten CAMs können somit von der Road Side Unit der Schutzeinrichtung empfangen, dekodiert und interpretiert werden. Die zuvor genannten Pflichtparameter werden genutzt, um Trajektorien und Abbiegewahrscheinlichkeit zu berechnen.

Für die Radfahrerschutzeinrichtung mussten die Koordinaten aller Verkehrsteilnehmer in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden. Die Car2X-CAMs liefern Koordinaten im WGS-84-System mit Längen- und Breitengrad. Die Radarsensoren (siehe Ausführung in Abschnitt 2.5) liefern dagegen X- und Y-Koordinaten in einem lokalen, kartesischen Sensorsystem. Zur Vereinheitlichung wurde wie für Car2X-TOPO-Nachrichten verfahren. Eine Kreuzung besitzt hier einen genau vermessenen Punkt in WGS-84-Koordinaten, der als

Ursprung eines kartesischen Kreuzungs-Koordinatensystems gilt. Auf diesem werden eine X- und Y-Achse konstruiert. Die über Car2X-CAMs, WLAN-Nachrichten und Radare erhaltenen Positionen werden alle in dieses gemeinsame System transformiert, um verglichen werden zu können. Die X-Achse des Referenzsystems liegt parallel zu den Breitengraden und die Y-Achse parallel zu den Längengraden der Erde.

Das WGS-84-System mit Längen- (lon) und Breitengrad (lat) nimmt die Erde als Ellipsoid an, während das kartesische System mit X und Y von einer Kugel ausgeht. Für die Transformation ist eine Näherung nötig, die für den kleinen betrachteten Bereich einer Verkehrskreuzung aber hinreichend genau ist. So ist folgende Berechnung möglich:

$$x = \text{Erdradius} \cdot \cos(\text{lat}) \cdot \cos(\text{lon})$$

$$y = \text{Erdradius} \cdot \cos(\text{lat}) \cdot \sin(\text{lon})$$

Mithilfe dieser Formeln für ein globales System sind nun noch die Koordinaten für das lokale Referenzsystem zu berechnen, in die die Koordinaten des Referenzursprungs einfließen. Da die Referenz-X- und Y-Achsen am WGS-84-System ausgerichtet sind, ist keine Rotation mehr nötig.

Sobald eine Kollision vorhergesagt wurde, informiert die Road Side Unit das betroffene Fahrzeug ebenfalls über Car2X. Hierfür dient der Nachrichtentyp DENM. Wie häufig gesendet wird, ist frei festlegbar. Solange ein Ereignis andauert, kann es ebenfalls zyklisch sein. Im Falle der Schutzeinrichtung wurde das Sendeintervall von einer beteiligten Applikation des DLR festgelegt und betrug etwa 10 Hz, sodass der Empfänger rechtzeitig und auch bei Paketverlust mit hoher Wahrscheinlichkeit informiert wird.

Die DENM-Nutzdaten enthalten nach dem C2XAppPayload-Teil einen *DecEnvNotification*-Teil. Dieser besteht wiederum aus *management* (u. a. mit Verlässlichkeitsangabe des Ereignisses), dem *event*, der Liste aus *taggedValues* sowie einer *location*. Das event enthält mit dem *causeCode* Angaben über die Ursache des Ereignisses sowie weitere, näher beschreibende Parameter. Die *taggedList* kann erneut Pflicht- und optionale Parameter enthalten.

Zuletzt enthält die *location* die Orts-Referenz (*locationRef*) zur Angabe der Ereignis-Position sowie ein Zielgebiet (*destinationArea*), um das für das Ereignis relevante Gebiet zu definieren. Im Falle der Radfahrer-Schutzeinrichtung kann die Orts-Referenz für den vorhergesagten Konfliktpunkt zwischen KFZ und Radfahrer genutzt werden. Anhand des Zielgebietes können unrelevante Nachrichten beim Empfänger aussortiert werden. Schließlich werden DENMs zunächst per Broadcast an alle Fahrzeuge in Reichweite und über Weiterleitung (Hopping) ggf. noch weiter versendet.

Der Zusammenbau der CAM wird von der KFZ-CCU erledigt. Die RSU muss lediglich alle erhaltenen Nachrichten vollständig dekodieren und die wenigen, zuvor genannten Parameter berücksichtigen. Für den Zusammenbau der vollständigen DENM ist die RSU selbst verantwortlich. Im folgenden Abschnitt wird die gewählte Lösung näher erläutert: Eine DENM-Vorlage (in Form einer XML-Datei) wird verwendet und nur die der aktuellen Situation entsprechenden Parameter geändert. Parameter wie Verlässlichkeit (*reliability*)

werden der Einfachheit halber auf einem konstanten Wert belassen. Parameter wie der Zeitstempel sind jedes Mal neu zu setzen, erklären sich aber auch von selbst. Zusammenfassend existieren die folgenden Parameter, die für eine Warnung vor querenden schwachen Verkehrsteilnehmern situationsbedingt anzupassen sind:

- actionID: Besteht aus stationID zur Identifizierung des Senders sowie einer für jedes Ereignis inkrementierten ID. Über diese lassen sich mehrere DENMs einer vorhergesagten Kollision zuordnen.
- cancelationFlag: Wird auf „wahr“ gesetzt, sobald eine Konfliktsituation aufgelöst wurde, die zuvor ebenfalls über eine DENM und mit derselben actionID bekannt gemacht wurde.
- causeCode: Wert = 30 (Menschen auf der Fahrbahn) nach TEC-Tabelle.
- subcause (optional): Wert = 2 für Radfahrer auf Straße.
- locationRef: Angabe des vorhergesagten Kollisionsortes. Dies spielt an Kreuzungen mit mehreren möglichen Querungspunkten zwischen KFZ und schwachen Verkehrsteilnehmern eine Rolle. Für die Schutzeinrichtung wurde die Angabe eines Kreises mit Mittelpunkt (WGS-84-Koordinaten) und einem Radius (in Metern) gewählt.
- destinationArea: Angabe des für den DENM-Empfänger relevanten Gebietes. In diesem Fall ist dies genau genommen die Fahrspur des sich nähernden KFZ. Zur Vereinfachung wurde auch hier ein Kreis gewählt, der jedoch die gesamte Kreuzung umschließt.

Über das cancelationFlag lassen sich KFZ in Reichweite darüber informieren, dass eine zuvor versendete Warnung ungültig wurde, da kein Konfliktpotential mehr besteht. Ein ähnlich klingender Parameter ist isNegation: Er wird auf „wahr“ gesetzt, wenn keine Kollision am angegebenen Ort erwartet wird, unabhängig von zuvor versendeten Warnungen. Er spielt für die Schutzeinrichtung keine Rolle, da nur dann DENMs versendet werden sollen, wenn eine Kollision vorhergesagt bzw. abgekündigt wird. Auch ist die referencePosition (in SimTD nur optional) durch die Angabe der locationRef nicht relevant.

Ein großer Vorteil der Car2X-Lösung sind die standardisierten Nachrichten und Parameterwerte. Die Schutzeinrichtung muss lediglich eine standardkonforme DENM mit dem causeCode senden, dass sich Menschen auf der Fahrbahn befinden. Wie diese Meldung im Fahrzeug letztendlich verarbeitet wird, wird dem Fahrzeug-Hersteller überlassen – sei es die Information des Fahrers über das HMI über Fahrerinformationssysteme oder gar die automatische Reaktion über Fahrerassistenzsysteme.

Für die Integration, Tests und Abschlussdemonstration der Schutzeinrichtung am ifak stand ein VW T5-Bus bereit. Das Manipulieren des HMI über den CAN-Bus hätte auch rechtliche Fragen aufgeworfen, weshalb eine alternative Lösung gefunden wurde: Dieselbe Handy-App, die auch für Radfahrer entwickelt wurde, kommt auf einem im Fahrzeug angebrachten Smartphone sowie Tablet zum Einsatz. Es erfolgt eine Verbindung mit einem WLAN-Hot Spot, den die im Fahrzeug installierte WLANp-CCU bereitstellt. Auf dieser CCU wurde neben dem SimTD-WLANp-Stack eine vom ifak entwickelte Anwendung installiert. In ihr wird durch eine Rückruffunktion (Callback) für jede erhaltene DENM eine WLAN-UDP-Nachricht erstellt. Diese enthält dieselben Parameter, wie die WLAN-UDP-Warnung von der Road Side Unit an schwache Verkehrsteilnehmer. In der mobilen App erfolgt durch die Auswahl der Rolle „KFZ“ kein Versand von Statusdaten, jedoch nach wie vor die Visualisierung von Warnungen. Nur wird statt vor einem querenden Fahrzeug vor einem querenden Radfahrer gewarnt.

## 2.4 Road Side Unit als Mediator zur Verarbeitung von WLANp- und WLAN-Daten

Fahrzeuge kommunizieren über WLANp, schwache Verkehrsteilnehmer über reguläres WLAN. Um eine Brücke zwischen beiden Standards zu bauen, wurde sich für eine infrastrukturseitige Lösung mittels Road Side Unit (RSU) entschieden. Diese ist nicht unbedingt ein einziges, monolithisches Gerät. So bestand im SK-34-Projekt ein Verbund aus folgenden Geräten:

- PC104-System als Application Unit (AU, siehe Abbildung 10). Dies ist ein passiv gekühlter PC, auf dem ein Linux-Betriebssystem sowie die zentrale Radfahrschutz-Anwendung installiert wurden. Außerdem besitzt die AU eine WLAN-Karte, an die per SMA-Stecker eine WLAN-Antenne angeschlossen wurde.
- WLANp-Funkmodul (CCU), das per Ethernet mit der AU verbunden wurde.
- Ein oder mehrere Radare (nähere Beschreibung in Abschnitt 2.5). Je nach Testfeld (ifak in Magdeburg sowie Kreuzungen in Braunschweig oder Düsseldorf) war es erforderlich, mehrere Radare über ein weiteres Zwischengerät und nur eine Ethernet-Leitung mit der AU zu verbinden.



Abbildung 10: Application Unit der RSU

Eine Herausforderung war der Betrieb des WLAN-Access Points. Dieser dient schwachen Verkehrsteilnehmern, die sich der Kreuzung und damit der RSU nähern und sich mit ihren Smart Devices automatisch anmelden. Hierbei ist essentiell, dass die Anmeldung durch das mobile Betriebssystem (z. B. Android) rechtzeitig geschieht, um früh genug Bewegungsdaten sammeln und vor sich nähernden Fahrzeugen warnen zu können.

Am ifak wurde die WLAN-Antenne der RSU auf einem Balkon im zweiten Stock eines Gebäudes angebracht. Sie besaß 3dBi Gewinn und arbeitete im 2,4 GHz-Frequenzband. Obwohl die Reichweite außerhalb des Gebäudes sehr gut sein müsste, waren die ersten Feldtests durchwachsen. Es stellte sich heraus, dass unter dem Balkon sowie in direkter Nähe das Signal sehr schwach war, wodurch sich die Anmeldung am WLAN dort verzögerte oder gar nicht möglich war. Fährt ein Radfahrer jedoch aus der Ferne auf die RSU zu, so geschah die Anmeldung mit ca. 60m vorher rechtzeitig. Jedoch stellte sich heraus, dass die Entfernung leicht vom verwendeten Smartphone abhängig war, da manche die Verbindung früher herstellen konnten, als andere. Für den Einsatz der Schutzeinrichtung in realen Umgebungen, in denen schwache Verkehrsteilnehmer ihre eigenen Endgeräte verwenden,

kann dies ein Problem sein, da man Geräte mit schlechter WLAN-Leistung erst in einem kleineren Umkreis um Kreuzungen in den Systemverbund integrieren kann.

Außerdem ist zu beachten, dass die WLAN-Reichweite sich davon unterscheidet, ob man bereits mit dem Access Point verbunden ist, oder nicht. Dies wurde am ifak in Magdeburg getestet. Sobald ein Smartphone mit dem Access Point auf dem Balkon des ifak-Gebäudes verbunden war, sendete es seine GNSS-Position zur RSU. Abbildung 11 zeigt den Plot der Positionen auf einer Karte. Es wurden zwei Versuche durchgeführt: Beim Ersten wurde erwartet, dass das Smartphone sich verbunden hatte, danach wurde sich vom Access Point entlang einer Straße (Werner-Heisenberg-Straße) wegbewegt, um den Punkt zu finden, ab dem die Verbindung verloren geht. Da die ganze Zeit eine Logging-App auf dem Smartphone aktiv war, zeigen die aufgezeichneten Positionen den WLAN-Abdeckungsbereich bei bereits hergestellter Verbindung. Im zweiten Versuch wurde zuerst der Bereich des Access Point verlassen, dann die Logging-App gestartet, dann auf den Access Point zubewegt. Die nun aufgezeichneten Positionen markieren den Bereich, bei dem erstmalig eine Verbindung aufgebaut wurde. Durch einen Kartenplot wird deutlich, dass sich diese Abdeckungsbereiche deutlich voneinander unterscheiden.

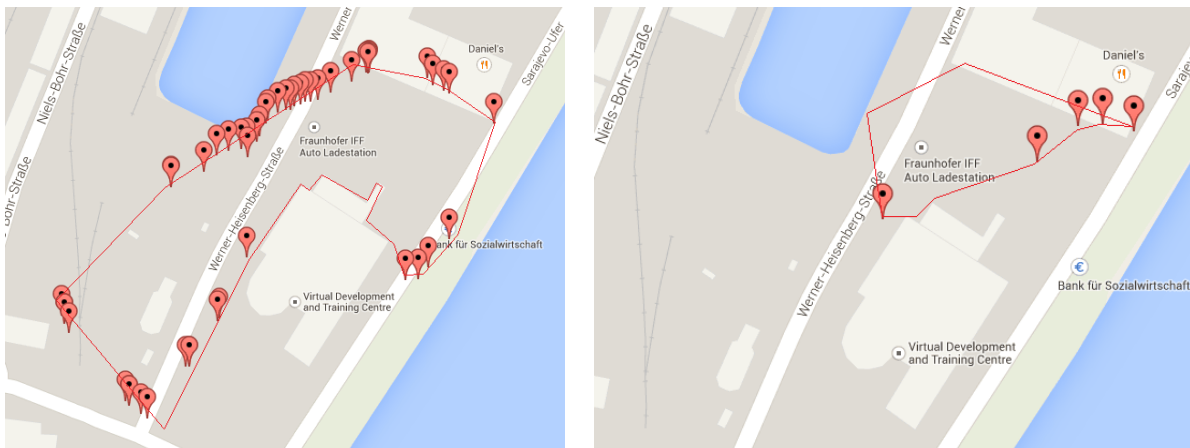


Abbildung 11: Test der WLAN-Reichweite (2,4 GHz) bei bestehender Verbindung zum Access Point (links) sowie dem erstmaligen Verbinden bei Annäherung (rechts).

Ein weiteres Problem stellte sich im Testfeld Braunschweig an der Kreuzung K047 (Hagenring/Brucknerstraße) heraus: Das verwendete WLAN-Frequenzband von 2,4 GHz wird bereits von derart vielen Hot Spots benutzt, dass alle Kanäle belegt sind. Das Signal der Schutzeinrichtungs-RSU wurde bereits wenige Meter weiter von anderen überlagert. Dadurch erfolgte die automatische Anmeldung von Smartphones an der RSU erst sehr spät, vor allem, wenn man sich als schneller Radfahrer näherte. Daher wurde eine neue Antenne (4dBi Gewinn) zum Betrieb im 5 GHz-Band angeschlossen. Dieses war nicht derartig belegt. Dafür bietet die höhere Frequenz prinzipbedingt eine geringere Reichweite und verlangt qualitativ höherwertigere Kabel mit geringer Dämpfung.

Letztendlich konnte die Schutzeinrichtung im städtischen Bereich (z. B. K047 in Braunschweig) bei 5 GHz und auf abgelegenen Strecken (z. B. Messeparkplatz in Düsseldorf) bei 2,4 GHz erfolgreich betrieben werden. Dennoch ist für eine Weiterentwicklung zu

diskutieren, ob Mobilfunk für die Datenübertragung genutzt werden sollte. Schließlich dauert es sehr lange, bis ein Radfahrer mit Smartphone sich am bereitgestellten Access Point automatisch angemeldet hat, wenn er sich auf eine mit der Schutzeinrichtung ausgestattete Kreuzung zubewegt. Hier zeigt sich erneut, wie sich nähernde Fahrzeuge von Car2X profitieren, welches keine Anmeldung an Basisstationen benötigt. Letztendlich kann das Konzept der Schutzeinrichtung auch von der Weiterentwicklung von Funktechnologien für Smartphones profitieren.

Im Teilprojekt Smarte Kreuzung von UR:BAN stellte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bereits eine Road Side Unit zur Verfügung, um Car2X-Dienste für weitere Projektpartner bereitzustellen. Für die Tests in den Prüffeldern Braunschweig und Düsseldorf sowie bei der Abschlusspräsentation auf dem Düsseldorfer Messeparkplatz wurde die ifak-AU mit der DLR-AU über einen Switch verbunden und somit in das RSU-Gesamtsystem integriert. Die ifak-AU stellte den Dienst der Radfahrer-Schutzeinrichtung samt WLAN-Access Point sowie das Auswerten von Radardaten bereit. Die DLR-AU stellte hingegen Dienste zum Empfangen und Senden von WLANp-Nachrichten bereit. Das Management aller Applikationen geschah über ein „Dominion“ genanntes Framework vom DLR Braunschweig. Dieses stellt zunächst einen Codegenerator (C++) bereit, mit dem das Codegrundgerüst für die Radfahrer-Schutzanwendung erstellt wurde. Über einen Editor ließen sich zudem Parameter definieren, die Dominion-Anwendungen miteinander austauschen können. Über einen Dominion-Server wird diese Art von gemeinsam genutztem Speicher verwaltet. Der Vorteil ist, dass Dominion-Anwendungen auf ein und demselben oder einem entfernten Rechner im Netzwerk, C++-Variablen gemeinsam nutzen können. Abbildung 12 zeigt dies an einem Beispiel: App 1 auf Rechner 1 muss lediglich eine gemeinsam genutzte Variable mit einem Wert belegen. Es ist keine explizite Code-Routine nötig, um diesen Wert an andere Programme zu übergeben. Der Dominion-Server verwaltet dies automatisch, sodass App 2 auf Rechner 2 den Wert automatisch in diese gemeinsam genutzte Variable geschrieben bekommt. Außerdem wäre es möglich, nicht mit dem Dominion-Framework erstellte Applikationen fernzusteuern (starten, pausieren, beenden).

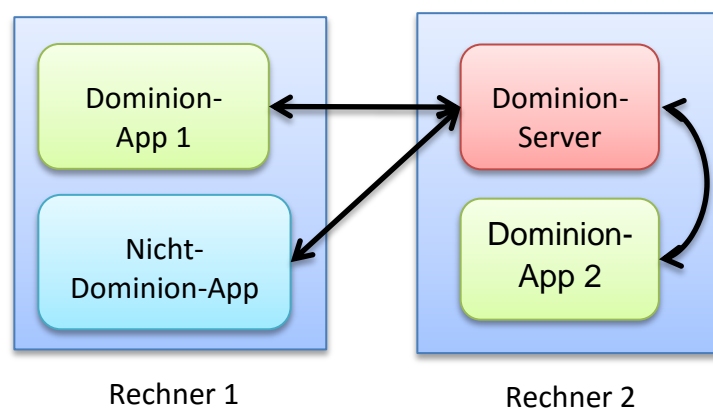


Abbildung 12: Verwaltung von mehreren Programmen durch einen Dominion-Server des DLR

Dieses Applikations-übergreifende Speichersystem wurde genutzt, um zwischen der Applikation für die Radardaten, die Radfahrer-Schutzapplikation sowie den WLANp-

Applikationen des DLR Daten auszutauschen. Die Radar-Applikation empfängt und interpretiert Daten zu erkannten Verkehrsteilnehmern und legt diese Informationen in gemeinsam genutzten Variablen ab. Die Radfahrer-Schutzapplikation sowie die Rückstauschätzung der TU Braunschweig können nun darauf zugreifen. Außerdem empfängt die WLANp-CCU des DLR Car2X-Nachrichten, leitet sie an die DLR-AU weiter, welche sie dekodiert und ebenfalls interpretiert, in freigegebenen Variablen ablegt. Auf diese kann nun die Radfahrer-Schutzapplikation zugreifen, um fertig interpretierte Car2X-CAMs zu erhalten. Das Zusammenspiel im Gesamtsystem ist in Abbildung 13 zu sehen.

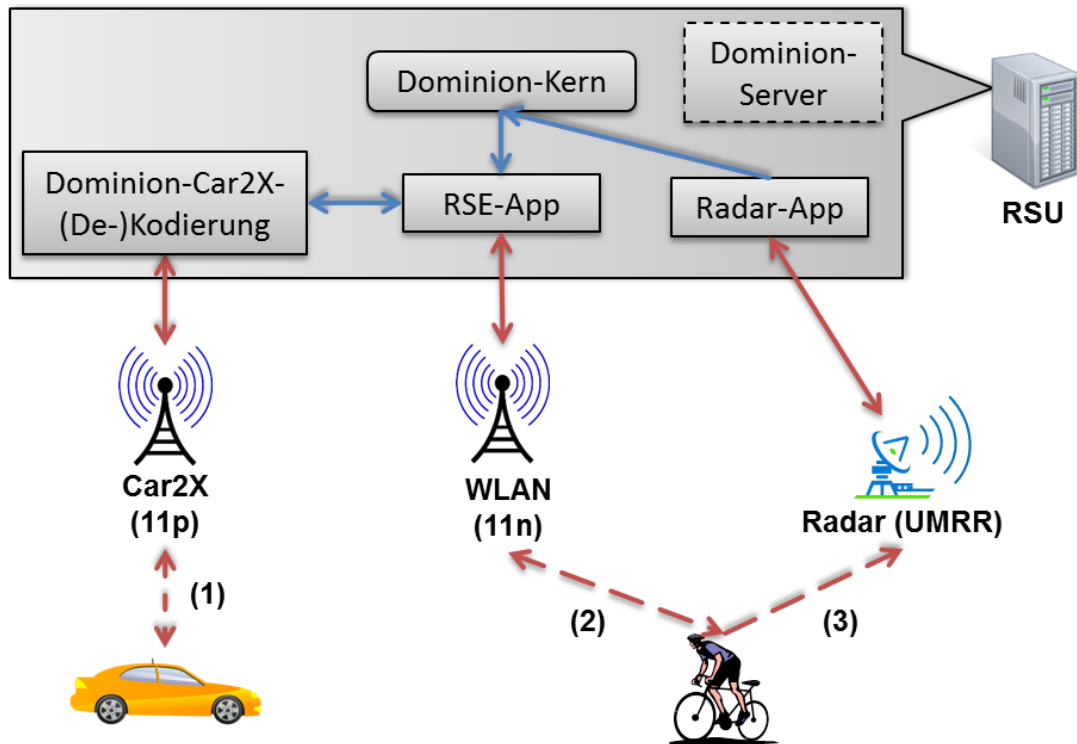


Abbildung 13: Schematische Darstellung von Architektur und Schnittstellen aller in SK-34 bearbeiteten Funktionen im Bereich einer Kreuzung: (1) Erkennung und Warnung von KFZ über 11p, (2) Erkennen und Warnen schw. Verkehrsteilnehmer über WLAN, (3) Erkennen schw. VT über Radar

Das DLR will das Dominion-Framework weiter ausbauen, um an Road Side Units bereitgestellte Dienste über eine Vielzahl von Applikationen zu ermöglichen, die untereinander Daten austauschen. Für die Implementierung der prototypischen Radfahrer-Schutzeinrichtung konnte dieses Prinzip erfolgreich genutzt werden. Für eine weitere Verwendung wären Lizenzfragen zu klären.

Jedoch erschwerte die Verwendung von Dominion zum Teil die Übersicht über den gesamten Systemverbund und brachte einige Hürden, die zu überwinden waren. So befand sich das Framework noch in der Entwicklung. Für die Dauer von UR:BAN wurde ein Versionsstand genutzt, der nicht aktualisiert wurde. Kleinere Probleme bei der Codegenerierung verzögerten etwas die erfolgreiche Implementierung. Weiterhin können Dominion-Applikationen nur in einem bestimmten IP-Adressbereich miteinander über das

Netzwerk kommunizieren bzw. gemeinsame Variablen nutzen. Entsprechende Adressen wurden über virtuelle Interfaces den Netzwerkkarten der Linux-Systeme zugewiesen.

## 2.5 Radare zur Verbesserung der Erkennung

Die Funktion der Radfahrer-Schutzanlage basiert auf der Annahme, dass genügend Verkehrsteilnehmer mit entsprechender Funktechnologie ausgerüstet sind, um ihre Positionen mitzuteilen und die infrastrukturseitige Schutzapplikation die Trajektorien berechnen zu lassen. Sensoren können dieses Prinzip ergänzen, um auch nicht ausgerüstete Teilnehmer zu erfassen. Folgende Systeme sind möglich:

- **Kameras** (unter Nutzung von sichtbarem Licht): Benötigen relativ viel Rechenleistung zum Verarbeiten der Daten. Zudem spielt Datenschutz hier eine große Rolle, da Bürger es lieber vermeiden, mit mehr Kameras als nötig im öffentlichen Raum überwacht zu werden. In der Dunkelheit wäre zudem die Unterstützung durch Infrarotlicht nötig, was die Lösung noch teurer machen würde.
- **Wärmebildkameras**: Erfassen Personen anhand der Körpertemperatur und erlauben eine höhere Anonymisierung gegenüber regulären Kameras. Jedoch ist auch hier eine höhere Rechenleistung bzw. Vorverarbeitung nötig. Außerdem kann die Erkennung von Fahrzeugen, deren Motor noch nicht heiß gelaufen ist, schwierig sein.
- **Radarsensoren**: Diese Sensorvariante wurde gewählt, da sie relativ wenig Rechenleistung benötigt, eine hohe Anonymisierung bietet und nicht derart von Licht- oder Wärmeverhältnissen abhängig ist wie die anderen beiden Varianten. Ein Nachteil ist, dass stehende Verkehrsteilnehmer schwer von der Umgebung (z. B. Stromkästen von der Größe einer Person) zu unterscheiden sind.

Es wurde sich für UMRR-Radarsensoren der Firma SmartMicro entschieden. Mit einem Sensor wurden die Tests am ifak sowie die Abschlussdemonstration auf dem Düsseldorfer Messeparkplatz durchgeführt. Weitere Sensoren waren bereits an den Forschungskreuzungen in Braunschweig (Hagenring/Brucknerstraße) und Düsseldorf (Oberbilker Markt) an den LSA-Masten befestigt. Sie werden vom DLR betrieben und sind über Schaltschränke an den Kreuzungen sowie im Fall von Braunschweig über einen Fernzugriff zugänglich.

Abbildung 14 zeigt die Sichtkegel der in Braunschweig angebrachten Sensoren. Ein Sensor überwacht jeweils eine Zufahrt und wurde ursprünglich auf die KFZ-Fahrspuren ausgerichtet. Die gleichzeitige Überwachung von schwachen Verkehrsteilnehmern (VRU) auf angrenzenden Fuß- und Radwegen wurde in Tests überprüft und als in Ordnung eingestuft. In jedem Fall konnte ein Radfahrer spätestens 60 m vor Erreichen der Haltelinie das erste Mal erkannt werden, teilweise bereits 100 m davor. Daher wurde die Radarlösung mit der vorhandenen Antenne (Typ 29) für die prototypische Schutzeinrichtung als geeignet eingestuft. Während Radfahrer relativ sicher detektiert werden, werden Fußgänger nicht immer erkannt oder auf dem Weg für ein paar Sekunden verloren. Gründe sind die gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern langsame Geschwindigkeit und geringe Größe bzw. Radarquerschnitt.



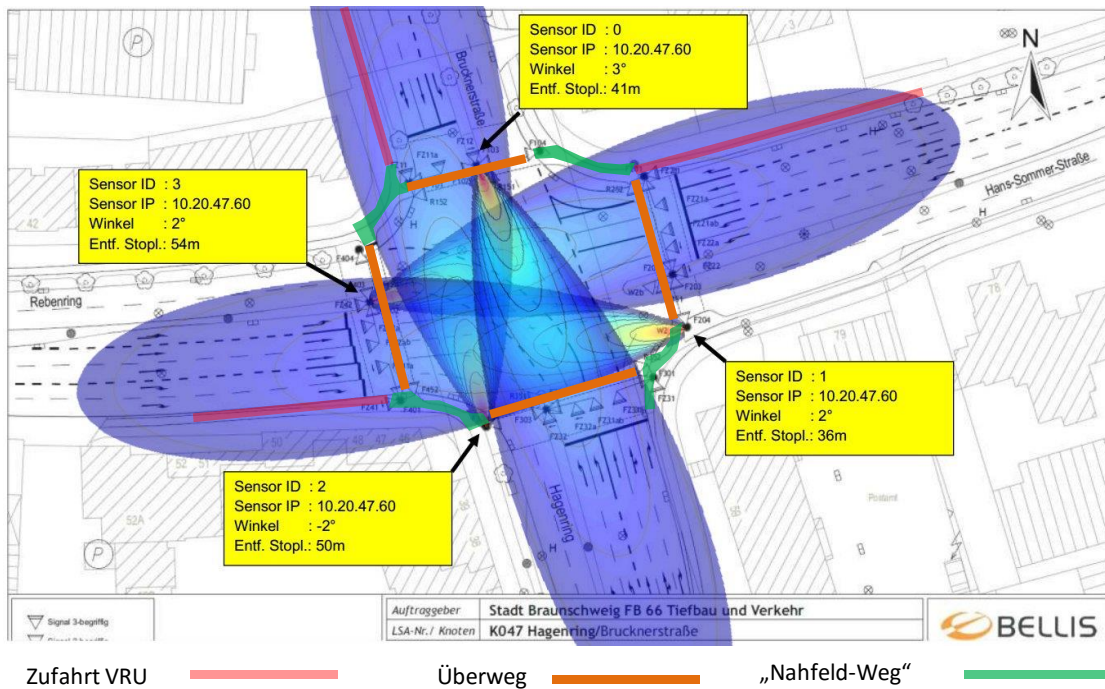


Abbildung 14: Sichtfeld der UMRR-Radarsensoren im Testfeld Braunschweig (K47)

Eine Herausforderung war die Integration eines oder mehrerer Radare in die Road Side Unit (RSU) sowie das Übertragen der Daten. Es existieren verschiedene Ausführungen des Sensors, einmal mit Ethernet-, einmal mit RS485-Anschluss. Mit Ethernet kann ein einzelner Sensor entweder direkt über einen Switch mit der Application Unit (AU) der RSU verbunden werden. Dies wurde für Tests am ifak in Magdeburg gewählt. Neben der Radfahrer-Schutzapplikation wurde eine Radar-Applikation erstellt. Diese wurde ebenfalls auf der AU installiert. Die Radar-Applikation stellt einen TCP-Server bereit, zu dem sich ein über Ethernet verbundener Radar automatisch verbindet.

In Braunschweig bestand jedoch bereits eine durch das DLR realisierte Anbindung aller vier Radare über Ethernet an einen sogenannten Bumper. Dieser war wiederum mit dem Switch der RSU verbunden. Der Bumper stellt bereits einen TCP-Server bereit, zu dem sich alle vier Sensoren dauerhaft verbinden. Die Radar-Applikation musste einen zusätzlichen TCP-Server erstellen, zu dem sich nun der Bumper verband. Er leitete alle von den Radaren gesammelten Daten weiter.

In Düsseldorf waren am Oberbilker Markt ebenfalls bereits durch das DLR vier Radare angebracht, die jedoch über die serielle Schnittstelle RS485 mit einem Traffic Management Interface Board (TMIB) des Radarherstellers SmartMicro verbunden waren. Dieses war wiederum per Ethernet mit dem Switch der RSU verbunden. Durch Bereitstellen eines TCP-Servers in der Radar-Applikation auf der AU konnten auch hier die Radardaten in Form von Ethernet-Paketen erhalten werden. Durch die Sensoranbindung über RS485 besitzen die Datenpakete jedoch ein anderes Format. Der Radar-Applikation ist daher beim Start mitzuteilen, nach welcher Art die Radare angebunden sind, um die Dekodierung entsprechend anzupassen.

Durch die Bereitstellung eines TCP-Servers verbinden sich angeschlossene Radare bzw. der Bumper oder das TMIB automatisch und senden mit fester Zykluszeit Daten. Dies sind TCP-Pakete, die einen Block für jeden erkannten Verkehrsteilnehmer enthalten. Der Vorteil ist, dass diese Daten bereits im Sensor vorverarbeitet wurden: Es müssen keine Rohdaten interpretiert werden, sondern es stehen für jedes erkannte Objekt folgende Parameter zur Verfügung:

- Objekt-ID: Ein einmal erkanntes Objekt wird solange verfolgt und mit einer eindeutigen ID versehen, bis es den Sichtbereich verlässt. Die ID bleibt sogar bestehen, wenn das Objekt für ein paar Sekunden nicht mehr erkannt wird.
- Objektlänge in Metern, die jedoch nicht jeden Wert, sondern Werte entsprechend einer Tabelle annimmt. Dadurch werden Objekte klassifiziert, z. B. 2,0 m für einen Radfahrer oder 4,4 m bis 8,4 m für ein KFZ.
- Geschwindigkeit in X- und Y-Richtung
- Entfernung in X- und Y-Richtung

Hier zeigt sich, dass jeder Sensor ein eigenes, lokales Sensorkoordinatensystem besitzt, wie auch Abbildung 15 zeigt. Für die Radfahrerschutzeinrichtung müssen die Koordinaten aller Verkehrsteilnehmer in das gemeinsame Referenz-Koordinatensystem überführt werden. Über das Einlesen einer Konfigurationsdatei wird der Abstand sowie Winkel eines Radarsensors in Bezug zum Kreuzungs-Referenzpunkt angegeben. Für eine Transformation in das Referenzsystem sind folgende Schritte nötig:

Rotation um Referenzpunkt:

$$\alpha_{Rad} = \alpha \cdot 2 \cdot \pi / 360$$

$$x_{ObjektGedreht} = x_{Objekt} \cdot \cos(\alpha_{Rad}) + y_{Objekt} \cdot \sin(\alpha_{Rad})$$

$$y_{ObjektGedreht} = -1 \cdot x_{Objekt} \cdot \sin(\alpha_{Rad}) + y_{Objekt} \cdot \cos(\alpha_{Rad})$$

Verschiebung in X- und Y-Richtung:

$$x_{ObjektImRefSys} = x_{ObjektGedreht} + x_{SensorPos}$$

$$y_{ObjektImRefSys} = y_{ObjektGedreht} + y_{SensorPos}$$

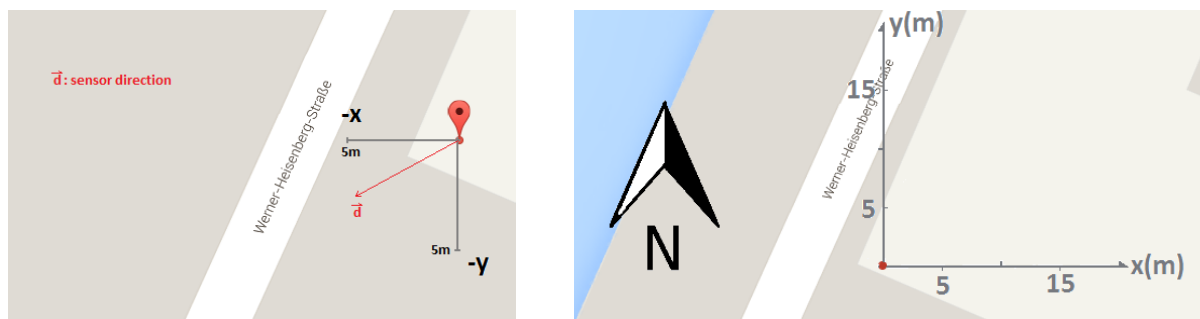


Abbildung 15: Lokales Sensorkoordinatensystem (links) sowie für eine Kreuzung einheitliches Referenz-Koordinatensystem (rechts)

Mit den nun erhaltenen Objektdaten eines Radarsensors lässt sich die Erkennung von Verkehrsteilnehmern verbessern. Abbildung 16 zeigt die möglichen Fälle:

- **Fall 1:** Über Funkdaten (z. B. Car2X-CAMs) sowie einen Radar wurde jeweils ein Objekt erkannt. Messfehler wirken sich auf beide Verfahren (GNSS und Radar) aus, sodass beide Punkte eine gewisse Entfernung zueinander besitzen. Diese sind aber noch so nah, dass davon ausgegangen werden kann, dass hier ein und derselbe Verkehrsteilnehmer erfasst wurde. Die verbesserte Position kann ein Punkt zwischen den beiden Positionen sein. Im einfachsten Fall liegt er genau auf halber Strecke. Über einen Gewichtungsfaktor kann jedoch einer Messmethode mehr vertraut werden als der anderen.
- **Fall 2:** Neben dem durch Funk erkannten Objekt befinden sich zwei Radarobjekte in etwa gleicher Entfernung. Da nicht feststellbar ist, welches Radarobjekt zum Funkobjekt gehört, kann keine Positionskorrektur stattfinden.
- **Fall 3:** Nur durch den Radar wurde ein Objekt erkannt. Eventuell handelt es sich um einen nicht durch Funk ausgerüsteten Verkehrsteilnehmer. Er wird in der Liste aller erkannten Teilnehmer ergänzt. Lediglich eine Warnung per Funk ist nicht möglich. Dafür kann er in die Berechnung von Konflikten einfließen und der Konfliktpartner eventuell per Funk gewarnt werden.

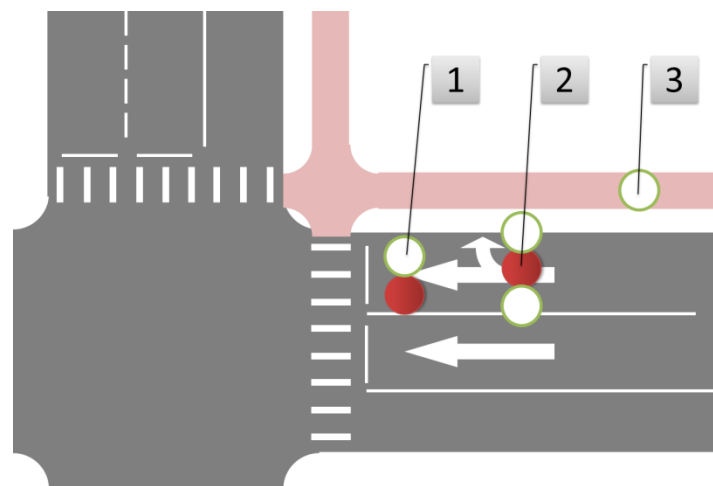


Abbildung 16: Zusätzlich zu Funk-Positionen (rot) kann Radar Verkehrsteilnehmer erkennen (grün-weiß)

## 2.6 Vorhersage von Kollisionen und Versand von Warnungen durch die RSU

Kontinuierlich werden durch Funk (Car2X/WLANp für KFZ bzw. WLAN für VRU) und Radare sich der Kreuzung nähernde Verkehrsteilnehmer erkannt. Die eigenständige Radar-Applikation legt die Radarobjekte in durch den Dominion-Server gemeinsam genutzten Variablen ab. Eine Applikation des DLR empfängt Car2X-CAMs von KFZ und stellt sie ebenfalls über Dominion-Variablen bereit. Zusätzlich werden Verkehrsteilnehmer ergänzt, die ihre Daten per WLAN und UDP-Paketen preisgeben.

Alle Positionsangaben werden in das kartesische Referenzkoordinatensystem der Kreuzung überführt, um miteinander vergleichbar zu sein. Objekte aus Car2X-CAMs werden automatisch als KFZ klassifiziert, Objekte aus WLAN-Daten als schwache Verkehrsteilnehmer.

Radarobjekte werden nach ihrer Position eingeteilt, nämlich, ob sie sich auf einer Straße oder einem Fuß- bzw. Radweg befinden. Die Radfahrer-Schutzapplikation liest die Objekt-Variablen zyklisch ein, um eine Liste aktuell erkannter Verkehrsteilnehmer zu bilden. Die Zykluszeit der Listenbildung ist prinzipiell auf einem niedrigen Wert zu halten, um eine hohe Aktualisierungsrate zu erhalten.

Für jeden Zyklus liegen nun Objekte mit verschiedenen Parametern vor, deren Trajektorien abzuschätzen sind, um Kollisionen zwischen KFZ und Radfahrern vorherzusagen. Typischerweise wird die Zeit bis zur Kollision berechnet (Time To Collision – TTC). Dies geschieht für jeden möglichen Kollisionspunkt im Kreuzungsbereich. Dies sind alle Punkte, an denen ein Überweg für Fußgänger oder Radfahrer (Vulnerable Road Users - VRUs) besteht und abbiegende KFZ gleichzeitig Grün bekommen. Dieser Punkt wird als Schnittpunkt zwischen Mitte der Fahrspur und Mitte des Überwegs der VRUs idealisiert.

Für KFZ könnte der Kurvenradius mit einbezogen werden, während VRUs lediglich eine Gerade vor sich haben. Jedoch wurde auch der zurückzulegende Weg für KFZ vereinfacht als Gerade angenommen. Somit ergibt sich für jeden Verkehrsteilnehmer die Distanz bis zum möglichen Kollisionspunkt aus dem direkten Weg zwischen aktuellem Standort und dem Kreuzungspunkt.

Zwar werden für VRUs und KFZ die Beschleunigungsdaten gemessen und übertragen. Für VRUs werden sie jedoch z. B. im Smartphone gemessen und hier durch weitere Bewegung des Geräts am Körper oder Fahrradlenker verfälscht. Vom Radar erkannte Objekte geben überhaupt keine Aussage über ihre Beschleunigung. Daher fand dieser Wert keinen Eingang in die Trajektorien-Berechnung. Letztendlich berechnet sich die Time To Collision im einfachsten Fall über die gleichmäßige Bewegung eines Körpers auf einer Bahn:

$$TTC = t = s/v$$

Während eines Zyklus der Radfahrer-Schutzapplikation wird diese für jede mögliche Paarung aus KFZ und VRU ermittelt. Es werden niemals die TTCs zweier KFZ oder zweier Radfahrer ermittelt, da sie sich nicht gegenseitig durch kreuzenden Verkehr gefährden. Eine Kollision wird als Wahrscheinlich angesehen, sobald die Differenz zweier TTCs einen Schwellwert unterschreitet. Dieser wurde für den Prototyp auf drei Sekunden festgelegt. Der Schwellwert ist kritisch für eine Weiterentwicklung der Schutzeinrichtung: Ist er zu gering gewählt, so schlägt das System zu selten Alarm und kritische Situationen werden eventuell nicht erkannt. Wird der Wert dagegen zu hoch gewählt, so warnt das System zu häufig und Verkehrsteilnehmer nehmen es nicht mehr ernst.

Ein kritischer Punkt ist die Abschätzung, ob ein Verkehrsteilnehmer die betrachtete Zufahrt überhaupt überqueren will. Als erstes müssen KFZ als auch VRU gleichzeitig Grün haben. Diese Information könnte entweder direkt aus dem LSA-Steuergerät gelesen werden, wenn die Road Side Unit sowieso in direkter Nähe zu diesem angebracht wird. Oder aber, die Car2X-SPAT-Nachrichten werden genutzt. Diese enthalten die aktuellen Ampelphasen sowie voraussichtliche Umschaltzeiten. Die vom DLR bereitgestellten RSUs versendeten die SPATs bereits. Ein Einlesen über WLANp oder direktes Bereitstellen über Dominion-Variablen wäre

technisch möglich. Es erfolgte lediglich für den RSE-Demonstrator keine Implementierung. Für eine marktreife Weiterentwicklung der RSE wäre dieses Feature zu berücksichtigen.

Weiterhin ist für schwache Verkehrsteilnehmer nicht sicher entscheidbar, ob sie geradeaus fahren und die Kreuzung überqueren, oder kurz vorher rechts abbiegen und dort den Weg weiter benutzen. Für eine sicherere Erkennung von Gefahren wurde der erste Fall angenommen. Für KFZ stehen dagegen mehr Informationen zur Verfügung. Zum einen werden sie abbiegen, wenn sie sich auf einer reinen Abbiegespur befinden. Diese Information kann der Kreuzungstopologie entnommen werden, die der RSU zum Versand der Car2X-TOPO-Nachrichten vorliegen muss. Zusätzlich kann ein gesetzter Blinker in den Car2X-CAMs kodiert werden.

Zur Verbesserung der TTC können weitere Aspekte betrachtet werden, die zwar die Robustheit des Systems verbessern, jedoch den Entwicklungsaufwand nicht unerheblich steigern. Ein Aspekt sind Rückstaus der KFZ. Abbildung 17 zeigt ein Beispiel, in dem vor der Haltelinie bereits mehrere KFZ stehen, sodass beim Wechsel auf Grün alle erst beschleunigen müssen und die präsentierte Gleichung der gleichmäßigen Bewegung nicht genügt.

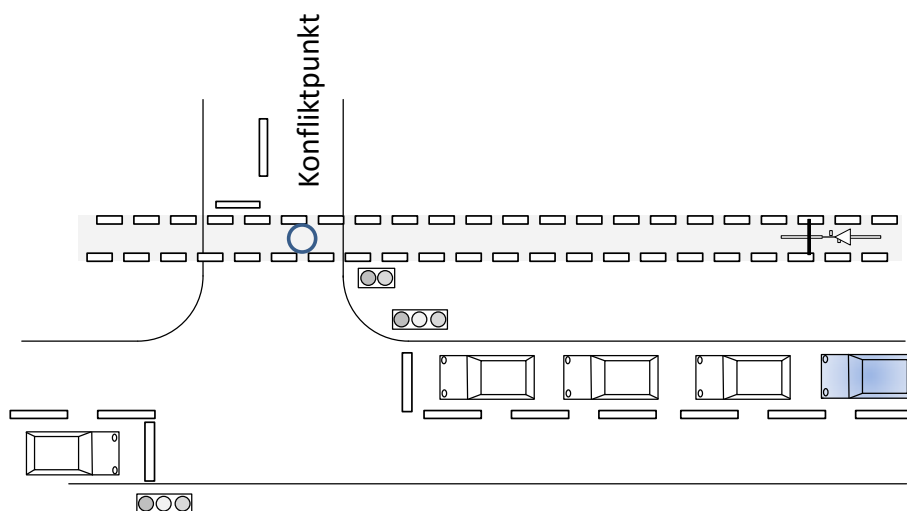


Abbildung 17: Durch Rückstau müssen KFZ erst anfahren, sodass sich die TTC vergrößert

Die Rückstaulänge könnte mit den Radaren der Radfahrer-Schutzeinrichtung abgeschätzt werden. Dies entwickelte die TU Braunschweig, die ebenfalls am Teilprojekt Smarte Kreuzung beteiligt war. Diese Funktion wurde jedoch erst spät im Projekt von der TU BS realisiert, sodass sie nicht mehr für die RSE genutzt werden konnte. Möglich wäre auch, die Rückstaulänge über die Fusion von Daten stationärer Schleifendetektoren mit den Daten der Car2X-CAMs zu ermitteln, was in [8] beschrieben wurde.

Nach [9] und [10] vergehen beim Anfahren durchschnittlich zwei Sekunden pro Fahrzeug, d. h. jedes Fahrzeug im Rückstau kann zwei Sekunden später anfahren als das direkte Vorderfahrzeug. Daraus ergibt sich die folgende Verzögerung:

$$t_{\text{Rückstau}} = \frac{\text{Entfernung}_{\text{Haltelinie}}}{l_{\text{KFZ}} + \text{AbstandZwischenKFZ}} \cdot 2s$$

Aus einer mittleren Fahrzeuglänge von vier Metern und einem Aufstellabstand von zwei Metern würde bei einer Entfernung des sechsten Fahrzeugs zur Haltelinie von 30 m (fünf Vorderfahrzeuge) das sechste Fahrzeug mit einer Verzögerung von zehn Sekunden anfahren können.

Wenn ein KFZ an einer LSA wartet, ist seine Geschwindigkeit null, wodurch die TTC nach der oben angegebenen, einfachen Formel gegen Unendlich geht. In diesem Fall ist die TTC-Berechnung durch folgende Gleichung zu ersetzen:

$$TTC_{\text{wartendesKFZ}} = t_{\text{Rückstau}} + t_{\text{Anfahren}}$$

Die Zeit zum Anfahren ist die Zeit, die ein KFZ im Durchschnitt benötigt, um auf eine konstante Geschwindigkeit zu beschleunigen. Steht es im Rückstau und wird an der nächsten Kreuzung abbiegen, so ist eher unwahrscheinlich, dass es bis auf die innerstädtisch erlaubten 50 km/h beschleunigen kann. Dies wird daher als Fall eingeschätzt, in dem eine rechnerische Bestimmung der TTC als zu ungenau eingeschätzt wird, da sie von zu vielen Faktoren abhängig ist.

Für eine Implementierung der Schutzeinrichtung an realen Kreuzungen wird der Fall am sichersten vorherzusagen sein, in dem sich KFZ und schwacher Verkehrsteilnehmer mit konstanter Geschwindigkeit auf die Kreuzung zubewegen und gleichzeitig Grün haben. Fußgänger haben eine so geringe Geschwindigkeit, dass das System sogar stets warnen sollte, sobald sie sich wenige Meter vom Übergang entfernt befinden. Eine Klassifizierung ist durch die Längenangabe des im Projekt verwendeten UMRR-Radarsensors möglich und wäre zudem über eine weitere Rollenauswahl in der Entwickelten Smartphone-App realisierbar.

In Fällen mit Rückstau sind diese zunächst zuverlässig zu erkennen. Für eine verlässliche Abschätzung der Anfahrzeit sollten für jede Kreuzung individuelle Statistiken aufgestellt und in der Schutzapplikation der RSU hinterlegt werden.

Durch schwankende Bewegungsgeschwindigkeiten wird auch die TTC-Berechnung nach linearer Formel beeinflusst. Die Werte können durch einen Filter geglättet werden. Für die Radfahrer-App wurde beispielsweise ein Tiefpassfilter erfolgreich eingesetzt. Für KFZ müsste die Filterung erst in der RSU geschehen, da der CAM-Versand der KFZ-CCUs nicht beeinflussbar ist. Für eine Filterung ist es erforderlich, mehrere CAMs zu sammeln. Hierfür muss ein KFZ identifizierbar sein. Zwar ist für Car2X vorgesehen, Identifizierungsparameter zwecks Anonymisierung ständig zu ändern. Jedoch sollen sie im näheren Umkreis von Verkehrskreuzungen konstant gehalten werden, um Car2X-Diensten wie der Schutzeinrichtungen eine zeitlich begrenzte Nachverfolgung zu ermöglichen.

Nicht zuletzt bietet es sich an, die Kollisionsvorhersage in Stufen auszubauen. Weit vor der Kreuzung (z. B. mehr als 50 m) kann die TTC linear berechnet werden, um sich später kreuzende KFZ und Radfahrer frühzeitig zu warnen, sodass sie aufeinander aufmerksam werden. In direkter Nähe zur Kreuzung (z. B. unter 25 m) ist es dagegen ratsam, zur Sicherheit in jedem Fall zu warnen. Diese Warnung könnte auch optisch intensiver

hervorgehoben werden sowie spätestens jetzt Ausweich- oder Bremsmanöver unterstützen. Für den in UR:BAN entwickelten Demonstrator wurde die Warnung per Smartphone-App in drei Stufen unterteilt: Die Warnung erscheint zuerst grün, dann gelb und zuletzt rot. In der letzten Stufe erklingt zudem ein Warnton.

## 2.7 Ergebnisse der Feldtests und Abschlussdemonstration

Zu Beginn wurden verschiedene Sensorsysteme zur Erfassung weiterer Verkehrsteilnehmer untersucht. Der Test von Systemen auf der Basis von Passiv-Infrarot-Sensoren verlief unbefriedigend: Sie erfordern zusätzlichen Installationsaufwand, bieten nur querschnittsbezogene Sensordaten sowie eine zu geringe Vorlaufzeit. Daher wurde der radarbasierten Sensorik der Vorzug gegeben. Hierfür wurde ein UMRR-Radarsensor der Firma SmartMicro beschafft. Dieses Modell ist auch an einer Forschungskreuzung in Braunschweig installiert, sodass für weitere Feldtests nicht erst das Gerät des ifak transportiert und installiert werden musste. Allgemein wurden mit dem Radar sehr gute Ergebnisse erzielt, wenn er auf der im Handbuch angegebenen Höhe zwischen zwei und acht Metern angebracht wurde. Der optimale Neigungswinkel zur Straße richtet sich nach der Installationshöhe. Daher auch schwache Verkehrsteilnehmer noch in kurzer Entfernung zur Kreuzung detektiert werden sollten, wurde der Winkel experimentell stets so eingestellt, dass auch noch 10 m vor einer Kreuzung Objekte erkannt wurden. Die maximale Erkennungsreichweite für Radfahrer betrug etwa 110 m, was für die Schutzeinrichtung als ausreichend bewertet werden kann.

Die ersten Feldtests fanden am ifak-Gebäude im Wissenschaftshafen in Magdeburg statt, um die Kommunikationskette zu prüfen. Daraufhin erfolgten mehrere Integrationstests an der Forschungskreuzung in Braunschweig (K047 - Hagenring/Brucknerstraße), in Düsseldorf am Oberbilker Markt sowie dem Düsseldorfer Messeparkplatz. Diese Tests geschahen zusammen mit den anderen Akteuren aus dem Teilprojekt Smarte Kreuzung, allen voran dem DLR, dessen RSU-Infrastruktur mit genutzt wurde.

Wie bereits in Abschnitt 2.4 geschildert, stellte sich bei den Feldtests in Braunschweig heraus, dass im 2,4 GHz-Bereich die WLAN-Kanäle derart überfüllt sind, dass die Zeit zur Anmeldung eines Radfahrers am Access Point der Schutzeinrichtung nicht ausreichte. Für urbane Gebiete wurde sich daher entschieden, das 5 GHz-Band zu nutzen. Für den Düsseldorfer Messeparkplatz, auf dem die Abschlussdemonstration durchgeführt werden sollte, genügte jedoch weiterhin der Betrieb im 2,4 GHz-Band, da hier keine konkurrierenden Access Points vorhanden waren. Hier bot die 2,4 GHz-Lösung eine noch etwas größere Reichweite.

Die an den Ampelmasten und vom DLR verwalteten Radarsensoren in Braunschweig und Düsseldorf wurden auf ihre Eignung zur gleichzeitigen Erfassung von KFZ und schwachen Verkehrsteilnehmern geprüft. Es stellte sich heraus, dass mit der verwendeten Antenne (Typ 29) und der Installationshöhe von ca. 3,50 m eine sehr gute Erkennung von KFZ, eine gute Erkennung von Radfahrern, jedoch eine mäßige Erkennung von Fußgängern möglich ist. Für diese wird vorgeschlagen, den Sensor mehr auf den Gehweg auszurichten oder gar einen

zweiten zu installieren. Auch könnte der Radar für Fußgänger einen steileren Neigungswinkel besitzen. Schließlich ist der für Fußgänger kritische Bereich, in dem sie aufgrund ihrer relativ geringen Geschwindigkeit erst zu warnen sind, kurz vor der Kreuzung. Hier verringert ein steilerer Sensorwinkel den „toten“ Bereich unter dem Sichtkegel.

In Braunschweig (K047) wurde die RSU mit WLAN-Antenne im südwestlichen Bereich der Kreuzung aufgebaut. Zur Durchführung der Tests wurde das Szenario eines geradeaus über die Kreuzung fahrenden Radfahrers sowie eines rechts abbiegenden KFZ (aus derselben Zufahrt kommend) nachgestellt. Dies wurde an Zufahrten durchgeführt, die zuvor als geeignet identifiziert wurden. Z. B. können Radfahrer und KFZ zwar an der südlichen Zufahrt der K047 gleichzeitig Grün haben. Jedoch schaltet die Ampel für KFZ erst einige Sekunden später auf Grün, sodass viele wartende Radfahrer die Kreuzung bereits passiert haben. Um den Versuch mit einer möglichst langen gemeinsamen Grünphase durchzuführen, wurde er hauptsächlich an der östlichen und nördlichen Zufahrt durchgeführt. An der westlichen Zufahrt war die Abschattung des dortigen Gebäudes so hoch, dass keine WLAN-Verbindung zwischen Smartphone und RSU rechtzeitig aufgebaut werden konnten. Solche baulichen Einschränkungen müssen bei der Planung der Installation einer derartigen Schutzzeineinrichtung entsprechend berücksichtigt werden, z. B. durch den Installationsort von WLAN-Antennen.



Abbildung 18: Leitkegel-Ladeschale, Leitkegel (SK35) und Wavebee auf Gestell

Am Lenker des Radfahrers wurde eine Handy-Halterung angebracht, in der das Smartphone befestigt wurde. Im Kofferraum des KFZ (VW T5-Bus) wurde eine Wavebee als Car2X-CCU installiert. Die CCU wurde über eine Schiene fest mit dem Kofferraumboden verbunden. Die Stromversorgung geschah über einen 12 V-KFZ-Stecker. Abbildung 18 zeigt den Aufbau während der Abschlussdemonstration, zusammen mit dem intelligenten Leitkegel aus SK-35. Die WLANp- sowie die GNSS-Antenne wurden magnetisch auf dem Fahrzeugdach befestigt.

An der Windschutzscheibe des KFZ wurde über eine Halterung ein Smartphone und an der Kopfstütze des Fahrersitzes ein Tablet befestigt. Abbildung 19 zeigt diesen Aufbau. Beide



Smart Devices wurden mit dem WLAN-Access Point der CCU verbunden, um ggf. Warnungen darstellen zu können.



Abbildung 19: Smartphone und Tablet im Demo-Fahrzeug zur Visualisierung der RSE-Warnungen

Für die Tests mussten zwei Kommunikationsketten funktionieren: die zwischen schwachem Verkehrsteilnehmer bzw. seinem Smartphone und der RSU sowie dem KFZ und der RSU. Während den Tests wurden mögliche Fehlerquellen identifiziert, auf die für einen reibungslosen Ablauf der Schutzeinrichtung zu achten ist:

- CCU des KFZ braucht GNSS-Empfang. Hier gab es bei den Feldtests keinerlei Probleme.
- CCU des KFZ muss so eingestellt sein, dass sie kontinuierlich CAMs versendet, mindestens mit 1 Hz. Diese konnten bei den Tests auf noch in über 100 m Entfernung von der Kreuzung erfolgreich von der RSU empfangen werden. Die übliche WLANp-Reichweite ist somit für die Schutzeinrichtung absolut ausreichend, Abschattungen bereiteten keine Probleme.
- KFZ-CCU musste für die UR:BAN-Tests und -Demonstration die Warnungen über WLAN auf den Smart Devices im Fahrzeug darstellen. Hier spielte die Ausrichtung der an der CCU befestigten WLAN-Antenne eine entscheidende Rolle für die erfolgreiche Verbindung. Für weitere Arbeiten mit dieser Lösung ist unbedingt auf eine hohe Signalstärke bzw. geschickte Unterbringung der Antenne zu achten, da das Signal vom Kofferraum zum Cockpit bereits zu schwach sein kann.
- Smartphone-App des Radfahrers sammelt Positionsdaten: Hierfür musste die Position über den internen GNSS-Sensor bestimmt werden. Bei manchen Smartphone-Modellen und Versuchsdurchläufen musste die App neu gestartet werden, bis dies (wieder) funktionierte.
- Verbindung des Radfahrer-Smartphones mit der RSU: Hierfür musste die WLAN-Verbindung einmalig gespeichert worden sein (SSID und Passwort) und die Signalstärke ausreichend sein. Durch Gebäudeabschattung gestalteten sich einige Zufahrten als schwierig. Für weitere Arbeiten ist diese Kommunikation unbedingt robust zu gestalten.
- Verarbeitung aller Daten auf der RSU: Es wurden Programme sowie Hardware vom ifak als auch vom DLR genutzt. Unter anderem kam das Dominion-Framework zum Einsatz, um Daten zwischen Applikationen auszutauschen. Die prototypischen Implementierungen liefen nicht immer stabil, sodass teilweise die ganze Anlage – auch für den Test der anderen „Smarte Kreuzung“-Applikationen – neu gestartet werden musste. Für weitere Arbeiten sind unbedingt die Zuständigkeiten für Hardware, Applikationen, Datenaustausch und Wartungszugänge zu klären. Die Arbeit mit Dominion ermöglichte zwar das Zusammenspiel

vieler Applikationen, teils von verschiedenen Akteuren, erforderte aber viel Zeit für Einarbeitung und Test. Viele Probleme taten erst auf den Application Units der Testfelder und noch nicht im ifak auf, obwohl dieselbe Dominion-Version genutzt wurde. Diese Fehler konnten erst in ausgiebigen Tests eliminiert werden, indem die Dominion-Applikationen angepasst wurden.

Für die Abschlussdemonstration wurde eine RSU auf dem Messeparkplatz in Düsseldorf aufgebaut. Interessenten wurden mit einem Shuttlebus zum Parkplatz gebracht und konnten sich für die Teilnahme an einer der Fahrdemos der verschiedenen Akteure beteiligen. Das ifak präsentierte mit seiner Fahrdemo erfolgreich nacheinander die Funktion der Radfahrer-Schutzeinrichtung sowie des intelligenten Leitkegels (SK-35). Zur Visualisierung der RSE-Warnungen wurde sowohl im KFZ als auch beim Fahrradfahrer die dreistufige Variante implementiert und vorgeführt. Beim Start der Vorführung fuhr ein Radfahrer ab einer vereinbarten Position auf die ausgerüstete Kreuzung zu. Nachdem er eine bestimmte Position auf etwa halber Strecke erreicht hatte, fuhr auch das Demofahrzeug los, sodass ab einer zuvor definierten Entfernung und durch den Kollisions-Berechnungs-Algorithmus die Warnungsstufen im Fahrzeug zu beobachten waren.

## **2.8 Erhebung über geeignete Möglichkeiten zur Warnung von Radfahrern mittels interaktiver Simulation und Befragung**

Während bei KFZ Car2X/WLANp zurzeit standardisiert wird, ist noch keine Standardmethode der Einbindung von schwachen Verkehrsteilnehmern in Sicht. Das Radfahrerschutzprojekt sollte daher einen Beitrag leisten, verschiedene Methoden der Einbindung in kooperative ITS zu untersuchen. Dass Radfahrer ein Smartphone mit entsprechender App bei sich tragen, ist nur eine Variante, da Smartphones weit verbreitet sind. Weitere Varianten der Warnung schwacher Verkehrsteilnehmer und ihre Auswirkungen wurden umfassend innerhalb einer studentischen Abschlussarbeit [11] untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse werden folgend zusammengefasst. Weitere Einzelheiten können Kapitel 6 der Abschlussarbeit entnommen werden.

Zunächst war vor allem zu Beginn der Projektlaufzeit die Google Glass-Datenbrille viel diskutiert. Dies war der Anlass, den Markt der Datenbrillen zu untersuchen, ein geeignetes Modell auszuwählen und in das Radfahrerschutzsystem zu integrieren. Gefragt waren sogenannte Optical See-through-Modelle, die die Sicht auf die Umgebung ermöglichen und mit im Sichtfeld dargestellten Informationen (z. B. über Projektion auf eine Glasfläche) anreichern. Dies fällt in den Bereich der erweiterten Realität (Augmented Reality, AR), bei dem sich ein Nutzer noch am Verkehrsgeschehen teilnehmen und mit Zusatzinfos versorgt werden könnte. Damit steht es im Gegensatz zu Virtual Reality (VR), die in letzter Zeit von vielen Herstellern geplant wird bzw. bereits auf den Markt gebracht wurde, jedoch keine Sicht auf die Umgebung und damit keine Teilnahme am Straßenverkehr erlaubt.

Die Google Glass ist das bekannteste Modell und war zur Projektlaufzeit als Entwicklerversion für 1500\$ auch in Deutschland erhältlich. Ein entscheidender Nachteil war die relativ starke Kopplung an ein Handy, welches den GNSS-Sensor bereitstellen muss.

Als bessere Alternative wurde die Epson Moverio BT-200 entdeckt. Sie war für bereits 700\$ in Deutschland verfügbar und besteht aus einem Basisteil sowie einer daran fest angeschlossenen Brille. Der Vorteil ist, dass sämtliche für die Radfahrerschutzeinrichtung erforderlichen Sensoren wie Beschleunigungsmesser, Kompass, Gyroskop und GNSS-Sensor bereits integriert sind. Damit erlaubt diese Datenbrille nicht nur die Visualisierung von Warnungen, sondern auch prinzipiell die Sammlung von Bewegungsinformationen schwacher Verkehrsteilnehmer. Darüber hinaus war ein Software Development Kit (SDK) verfügbar. Viele andere Datenbrillen waren zum Zeitpunkt der Marktanalyse noch nicht verfügbar und auch das zugehörige SDK nur angekündigt, sodass eine Verwendung noch nicht abzusehen war. Daher wurde sich für die Epson-Brille entschieden.



Abbildung 20: Über Datenbrille sichtbare Warnung in interaktiver Simulation

Die Datenbrille und andere technische Möglichkeiten zur Gefahrenmeldung wurden untersucht, ggf. umgesetzt und über eine Nutzerbefragung evaluiert. Dazu zählen:

- Datenbrille (im Projekt beschafft und in RSE-System eingebunden)
- Vibration über Armband am Handgelenk (prototypisch konstruiert)
- Akustische Ausgabe über Kopfhörer
- Visuelle Ausgabe über Smartphone am Fahrradlenker (im RSE-System eingebunden und bei Tests und Demos verwendet)
- Vibration im Griff des Fahrradlenkers (nur in Nutzerbefragung)
- Akustische Ausgabe über Smartphone am Fahrradlenker (nur in Nutzerbefragung)

Abbildung 20 zeigt mithilfe einer interaktiven Simulation, wie die Warnausgabe einem Nutzer erscheint, der die Datenbrille aufgesetzt hat. Es wurde sich für einen einfachen Warnpfeil entscheiden, der dezent aus der Richtung der Gefahr (hier dem bald kreuzenden KFZ) in Richtung des Sichtmittelpunktes gleitet. Diese Animation wiederholt sich nach etwa einer Sekunde. Die dezente Darstellung ist für solch eine Augmented Reality-Anwendung von hoher Bedeutung, um das Sichtfeld des Nutzers nicht zu stark zu versperren und die Ablenkung gering zu halten. Des Weiteren könnte man denken, dass eine rote Warnung am ehesten bemerkt würde. Stattdessen werden blaue und weiße Farben beim peripheren Sehen des Menschen viel eher bemerkt. Rot fällt hingegen im Sichtzentrum (foveales Sehen) viel mehr auf, welches jedoch bei AR-Anwendungen und der Teilnahme im Straßenverkehr unbedingt freibleiben sollte.

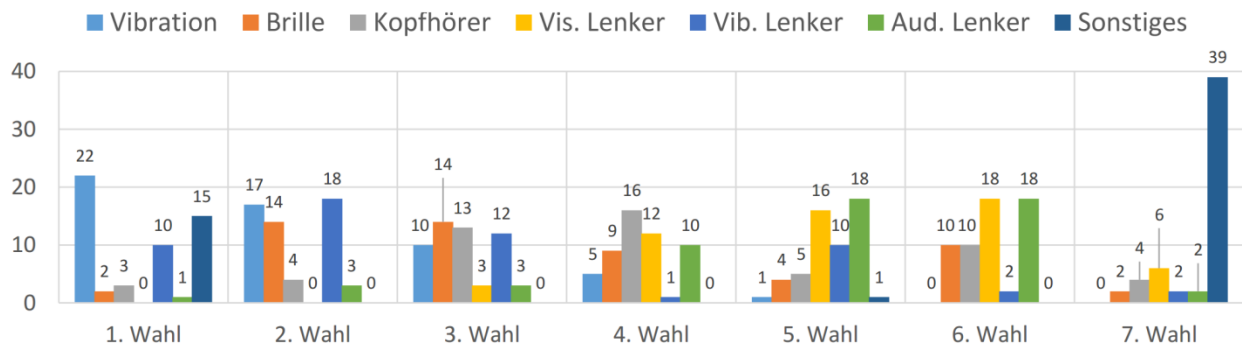


Abbildung 21: Auswertung der Nutzerbefragung zu beliebtester (1. Wahl) bis unbeliebtester (7. Wahl) Variante zur Warnung vor Fahrzeugen, die einen als Radfahrer an Kreuzungen gefährden

Abbildung 21 zeigt die grafische Auswertung einer Nutzerbefragung, in der die verschiedenen Lösungen der Beliebtheit nach zu sortieren waren. Sie konnten teilweise in einer interaktiven Simulation ausprobiert werden. Es wird deutlich, dass die visuelle Darstellung am Fahrradlenker eher weniger vorgezogen wurde. Besser kam bereits die Datenbrille an, da ihre Warnung im Sichtfeld angezeigt wird und weniger ablenkt. Jedoch wurde das Tragen der Datenbrille, vor allem als Brillenträger, als teilweise störend empfunden. Als am beliebtesten wurde jedoch ein prototypisches Vibrationsarmband bewertet, das vibrierte, sobald die Radfahrerschutzeinrichtung in der Simulation eine Kollision vorhersagte und der Nutzer (Radfahrer) sich nahe der Kreuzung befand.

Aus der Befragung wird zunächst die Schlussfolgerung gezogen, dass verschiedene Nutzer verschiedene Methoden der Gefahrendarstellung favorisieren und es nicht „die“ perfekte Variante gibt. Die Einbindung schwacher Verkehrsteilnehmer in kooperative ITS wird noch einige Zeit darauf basieren, dass freiwillig eine Methode genutzt wird, da noch keine regulatorischen Maßnahmen in Sicht sind. Um potentielle Nutzer anzusprechen, ist wahrscheinlich ein breites Angebot an Darstellungsmaßnahmen erforderlich. Hier sind vor allem die Entwicklungen auf dem Markt der Wearables wie Smartwatches zu beobachten. Solchen Geräten, die ein Nutzer „sowieso“ bei sich trägt, die Vibrationen auslösen können und über drahtlose Kommunikation mit dem ITS kommunizieren können, wird das größte Potential zugerechnet, von Anwendern akzeptiert zu werden.

Weiterhin wurde anhand der interaktiven Simulation die Wirkung der Schutzeinrichtung auf Unfallzahlen untersucht. So konnte die Nullhypothese, dass Probanden mit Warngerät und korrekter Warnausgabe im Vergleich zu Probanden ohne Warngerät gleichviel oder mehr Unfälle hätten, nicht abgelehnt werden. Die Arbeitshypothese, dass allein das Vorhandensein einer Warnausgabe zu einer signifikanten Reduzierung der Unfallzahl führt, konnte jedoch nicht bestätigt werden.

Die Reduzierung der Unfallquote hängt stärker von der Art des Warngerätes ab, als anfangs vermutet. Ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Warngeräten war nicht nachweisbar. Es ist ein Trend zu erkennen, dass sich Probanden im Laufe der Simulation auf ein Warngerät verlassen und bei Warnausfall eine höhere Unfallzahl vorweisen, verglichen mit der Kontrollgruppe ohne Warngerät.

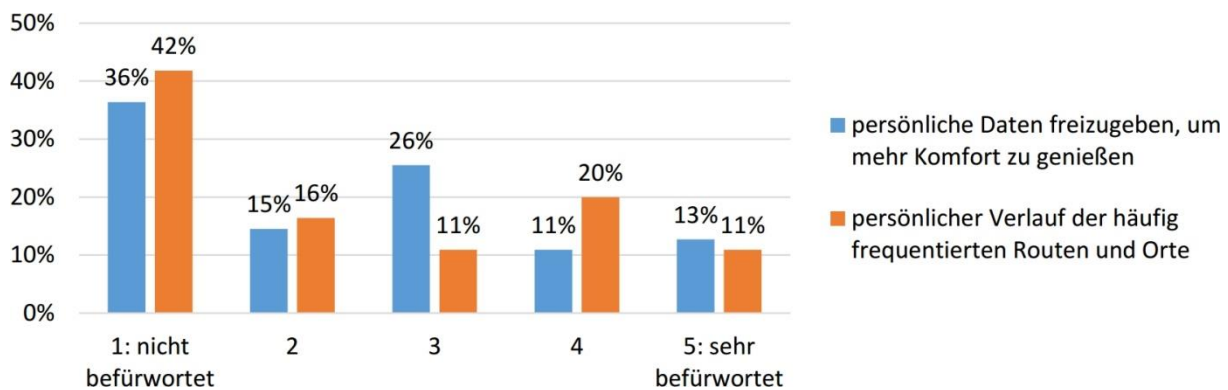


Abbildung 22: Befragung über Bereitschaft, zwecks Verkehrssicherheit persönliche Daten preiszugeben

Zuletzt zeigt Abbildung 22 das Ergebnis einer Befragung zur Bereitschaft, persönliche Daten preiszugeben, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Dies ist eine Frage des Datenschutzes, da der Radfahrerschutzeinrichtung mitgeteilt wird, wann man sich wo befunden hat. Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der befragten Personen einer Freigabe von persönlichen Daten zur Steigerung des Komforts nicht befürwortet. Weiterhin möchte ein Großteil der Befragten nicht, dass der Standortverlauf protokolliert wird.

Bei der Befragung zeigte sich, dass die Mehrheit der Probanden zur Freigabe von

Positionsdaten bereit ist, wenn das geplante System diese ausschließlich zur Warnung und Unfallreduktion einsetzt. Dabei ist für einige Probanden eine abgesicherte Übertragung wichtig.

Bei der Frage, was gegen die Verwendung von Positionsdaten innerhalb der Kreuzung spricht, nannten die meisten Probanden, dass es ihnen Unbehagen bereitet, Positionsdaten aktiv zu senden. Sie befürchten das Ausspähen der Daten oder die Erstellung einer Historie des Standortes. Vereinzelt nannten die Testpersonen weitere Aspekte. Einige befürchten, dass Versicherer Zugriff auf die Daten bei einem Unfall bekämen und diese Daten als Beweise gegen die Probanden verwenden. Durch Fehler oder Manipulationen bei den Aufzeichnungen könnten Radfahrer oder Kraftfahrer auch zu Unrecht beschuldigt werden. Älteren Probanden waren die Technik insgesamt und die Freigabe von Daten nicht vertraut, weshalb sie ebenfalls das System ablehnten. Ähnliche Reaktionen konnten bei der Präsentation der Schutzeinrichtung in persönlichen Gesprächen bei der langen Nacht der Wissenschaft im ifak vernommen werden.

Diese Reaktionen zeigen, dass Security und Privacy entscheidende Faktoren bei der Umsetzung solch einer Schutzeinrichtung sind. Bei KFZ und WLANp wird die anonyme Preisgabe von Daten über Fahrzeughersteller getrieben. Am Beispiel eCall wird der Einbau von Kommunikationstechnik vom Gesetzgeber vorgeschrieben. Eine ähnliche Entwicklung ist für schwache Verkehrsteilnehmer noch nicht abzusehen. Dies und die restlichen Resultate des Projektes führen zu der Erkenntnis, dass sich lediglich ein Teil der schwachen Verkehrsteilnehmer zur aktiven Integration in kooperative ITS bewegen lässt, auch, wenn die Erhöhung von Verkehrssicherheit versprochen wird. Es wird in absehbarer Zukunft nur eine partielle Erfassung und Warnung über von Fußgängern oder Radfahrern selbst gewählte

Endgeräte geben. Daher ist die Erfassung über weitere Sensorik wie dir hier betrachteten Radare essentiell. Auch wird die Darstellung einer Kollisionswarnung viel eher im KFZ als bei schwachen Verkehrsteilnehmern aufgrund der vorhandenen Technik möglich sein. Die Zukunft einer Radfahrerschutzeinrichtung wird viel mehr über die Verteilung von WLANp-CAMs und eine Darstellung im KFZ-HMI oder gar eine automatische Bremsung gesehen, als eine Warnung beim Fußgänger bzw. Radfahrer. Eine Ergänzung über infrastrukturseitige Maßnahmen wie visuelle und akustische Warnungen direkt an der Kreuzung sind ebenfalls denkbar.

## 2.9 Simulative Abschätzung der verkehrlichen Wirkungen

Für den Meilensteinbericht 4 hat die TU München mithilfe von VISSIM Verkehrssimulationen für diverse SK34-Applikationen durchgeführt, um die verkehrlichen Wirkungen abzuschätzen. Für SK34 und SK35 wurden zudem die Sicherheits-relevanten Wirkungen über Sicherheitskenngrößen simuliert. Abbildung 23 zeigt ein Bildschirmfoto für die Radfahrerschutzeinrichtung. Die Simulationen wurden für verschiedene Zufahrtstypen durchgeführt, die sich in Anzahl der Spuren und erlaubten Abbiegungen unterschieden. Ein Auszug der Ergebnisse ist im Folgenden in Sicherheit und Verkehrseffizienz aufgeteilt.

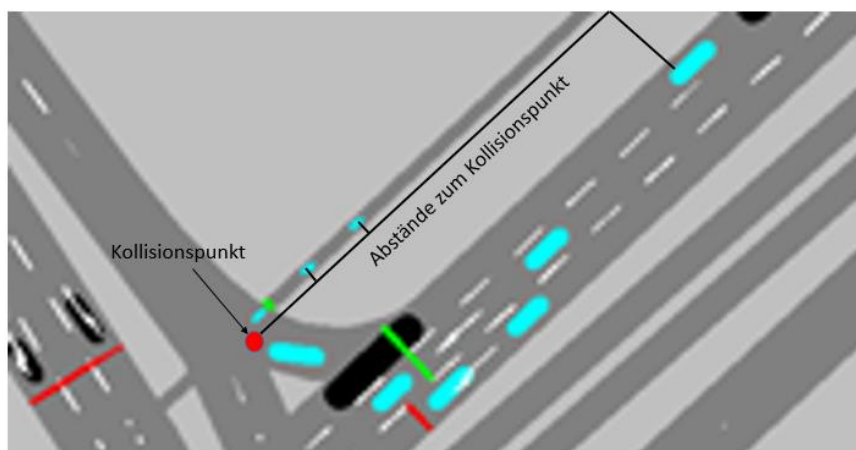


Abbildung 23: In VISSIM für die Radfahrer-Schutzeinrichtung durchgeführte Verkehrssimulation

### Sicherheit

Es war abzuschätzen, wie sich eine Radfahrer-Schutzeinrichtung auf die Verkehrssicherheit auswirkt. Der Ansatz liegt nahe, dass durch sie Unfälle vermieden werden und die Anzahl Verletzter bzw. Toter sinkt. Im Idealfall funktioniert das System immer, alle Beteiligten reagieren auf die Warnungen und die Unfallrate sinkt auf null.

In der Realität würde die Ausstattungsrate zunächst gering sein und mit den Jahren steigen. Für einen deutlichen Vergleich wurden jedoch lediglich die Ausstattungsraten von 0% und 100% verglichen. Bedingungen für die Fehlfunktion des Systems oder das nicht Beachten von Warnungen sind nicht abschätzbar, sodass diese Faktoren mit Zufallswerten hätten

einfließen müssen. Zum deutlichen Vergleich wurde auch hier eine 100%ige Funktion bzw. Beachtung angenommen.

Darüber hinaus ist ein Problem von Simulationsumgebungen wie VISSIM oder SUMO, dass sie keine Unfälle abbilden können. Die Logik-Modelle der Verkehrsteilnehmer erlauben keine Berührungen oder gar Überschneidungen. Als Ersatz wurde der Einfluss auf die Sicherheitskenngrößen Time-to-Collision (TTC) und Post-Enchroachment Time (PET) ermittelt.

Die TTC bezeichnet die Zeit, die rechnerisch bleibt, bis zwei Verkehrsteilnehmer miteinander kollidieren, wenn beide ihre Geschwindigkeit beibehalten. Zur Ermittlung der PET wird dagegen ein vorhandener Konfliktbereich betrachtet. Die PET bezeichnet die Zeitspanne zwischen dem Verlassen des Konfliktbereiches durch den ersten Verkehrsteilnehmer (z. B. ein Radfahrer) und dem Erreichen des Konfliktbereiches durch den zweiten Teilnehmer (z. B. ein rechts abbiegendes Fahrzeug).

Für alle Zufahrtstypen wurde zum einen die Ausstattungsrate variiert: Bei 0% Ausstattung bemerkt der Kraftfahrer einen Radfahrer erst kurz vor dem Abbiegen. Bei 100% Ausstattung bemerkt er ihn bereits einige Zeit vor Erreichen der Kreuzung, weshalb er seine Geschwindigkeit früher anpassen kann. Außerdem wurde eine reale Kreuzung (Oberbilkler Markt in Düsseldorf) für zwei verschiedene Tageszeiten simuliert, um ein verschieden starkes Verkehrsaufkommen zu berücksichtigen.

Insgesamt zeigen sich fast durchgehend positive Wirkungen auf die Verkehrssicherheit. So steigen die TTC und PET Werte in nahezu allen Szenarien an, meist auch statistisch signifikant. Umgekehrt wird die Dauer des Auftretens kritischer TTC Werte zumeist signifikant reduziert. Die Verteilung der minimalen auftretenden TTC und PET verschiebt sich hin zu größeren Werten, somit liegen tendenziell größere Abstände vor, welche für einen sichereren Verkehrsablauf sprechen. Für höhere Verkehrsbelastungen (Spitzenstunde 16-17 Uhr) lassen sich bis auf die mittlere TTC ebenfalls signifikante Änderungen feststellen. Abbildung 24 zeigt die simulativ ermittelten Verbesserungen der PET anhand eines Boxplots für den Zufahrtstyp 1 mit lediglich einer Fahrspur. Weitere Details, Ergebnisse und Grafiken können dem Meilensteinbericht 4 der TUM entnommen werden.

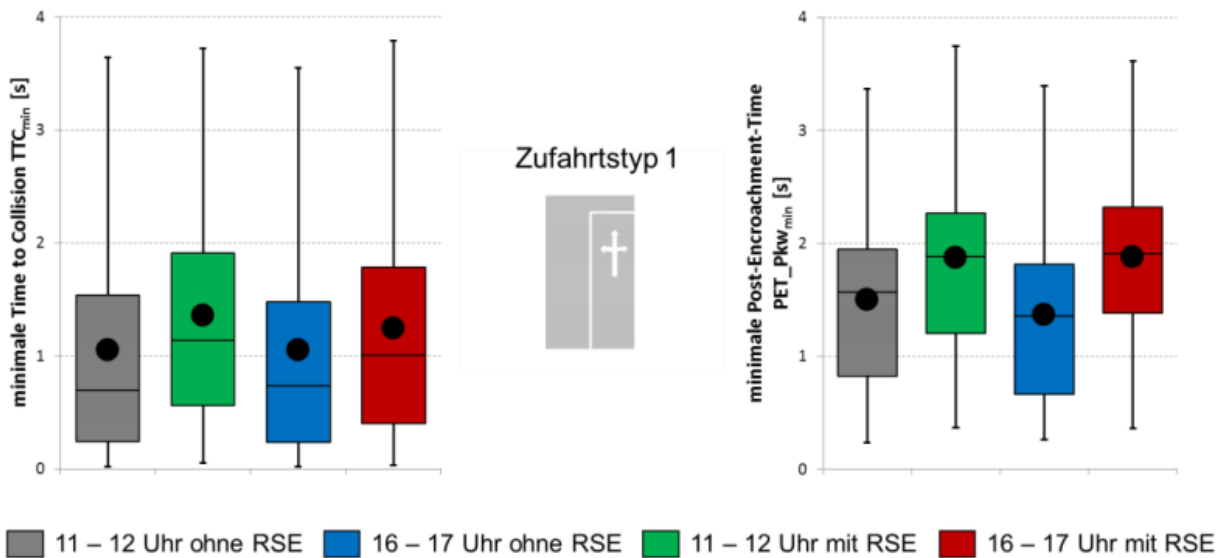


Abbildung 24: Verteilung der mittleren Post-Encroachment Time ( $PET_{mean}$ ) und der mittleren Time-to-Collision ( $TTC_{mean}$ ) für Zufahrtstyp 1

### Verkehrseffizienz

Die TUM hat für den Meilensteinbericht 4 ebenfalls die Wirkungen der RSE auf die Verkehrseffizienz simulativ ermittelt. Hierfür wurden alle Pkw berücksichtigt, welche die jeweils betrachtete Zufahrt befahren. Zur Analyse der Effizienz wurden die Änderungen der mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeit  $v_m$ , der Anzahl der Halte  $n_{Halte}$  sowie der Reisezeit  $t_{RZ}$  berücksichtigt.

Aufgrund der in der Nachbildung der Applikation unterstellten Geschwindigkeitsanpassung der mit dem System ausgestatteten rechtsabbiegenden Fahrzeuge kommt es zu einer Beeinflussung der mittleren Geschwindigkeit in der gesamten Zufahrt um ca. 1 - 2 km/h. Erkennbar ist diese Änderung ebenfalls bei der Betrachtung des Geschwindigkeitsverlaufs bei der Annäherung an den Knotenpunkt (siehe Abbildung 25). Einhergehend mit der sinkenden mittleren Einzelfahrzeuggeschwindigkeit steigt die Reisezeit für die Befahrung des Knotenpunktes um etwa 10 %.



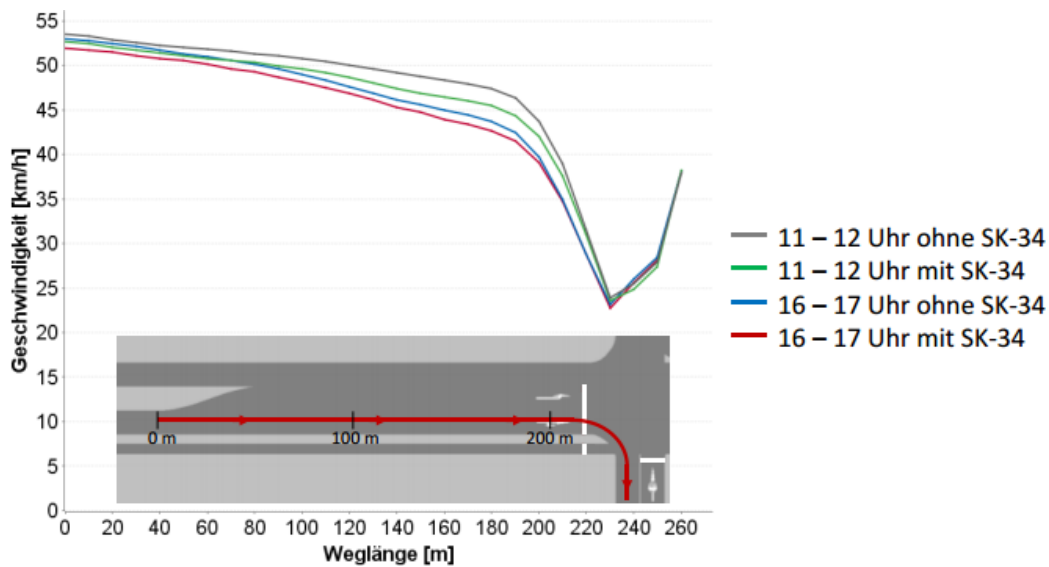


Abbildung 25: Geschwindigkeitsverlauf (lokale Geschw.) für die Annäherung an den Knotenpunkt mit Zufahrtstyp 2 unter Einfluss der RSE

Als positiver Effekt der SK-34-Applikation lässt sich feststellen, dass die mittlere Anzahl der Halte für die ausgestatteten Fahrzeuge tendenziell sinkt. Dieser Effekt ist

bei hohen Verkehrsbelastungen (Spitzenbelastung 16 – 17 Uhr) stärker ausgeprägt.

Grundlage der getroffenen Aussage zur Effizienz der SK-34-Applikation ist die angenommene Reaktion des Fahrers (Geschwindigkeitsreduzierung) auf die angezeigte Warnung vor einem parallel fahrenden Radfahrer. Unter der Voraussetzung einer hier betrachteten Fahrerreaktion zeigen die Effizienzbetrachtungen insgesamt, dass die auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit abzielende SK-34-Applikation eher negative Auswirkungen auf die Effizienz des Verkehrsablaufes am Knotenpunkt hat. Dies ist jedoch prinzipbedingt: Für eine Erhöhung der Sicherheit wird ein Bremsvorgang in der Simulation vorausgesetzt, wodurch punktuell eine geringfügig höhere Reisezeit unvermeidbar ist.

## 2.10 Verwendung der Zuwendung sowie Gegenüberstellung der vorgegebenen mit den erreichten Zielen

Mit der Radfahrer-Schutzeinrichtung wurde erstmalig untersucht, wie schwache Verkehrsteilnehmer in ein kooperatives, intelligentes Verkehrssystem integriert werden können, um die allgemeine Verkehrssicherheit zu erhöhen. Das vorrangige Ziel war damit die Verringerung von Unfällen mit Personenschaden. Darüber hinaus werden sich querende Verkehrsteilnehmer wie KFZ und Radfahrer frühzeitig aufeinander aufmerksam gemacht, sodass verspätetes Erkennen und notwendige Gefahrenbremsungen reduziert werden. Dies hat somit auch positive Effekte auf den Verkehrsfluss und eine Verringerung von Auffahrunfällen aufgrund plötzlicher Bremsmanöver im Kreuzungsbereich. Auf lange Sicht kann solch ein System zum Schutz von Radfahrern das allgemeine Sicherheitsgefühl und damit die Attraktivität des Radfahrens stärken.

Zunächst lässt sich sagen, dass alle Ziele erreicht wurden. Die Schutzeinrichtung wurde erfolgreich geplant, implementiert und bei der Abschlussdemonstration in Düsseldorf präsentiert. Die Integration schwacher Verkehrsteilnehmer wurde über Smartphones und WLAN erfolgreich umgesetzt. Die Integration von KFZ wurde über Car2X-Nachrichten ebenso erfolgreich integriert. Nicht zuletzt konnte ein Verfahren gefunden werden, Kollisionen zwischen Verkehrsteilnehmern vorherzusagen. Dies geschieht über die Analyse der Bewegungen und Berechnung der Zeitdauer bis zur Ankunft an einem Konfliktpunkt. Letztendlich konnte die gesamte Kommunikationskette und Schutzfunktion auf den Prüffeldern in Braunschweig sowie Düsseldorf erfolgreich getestet werden. Die Ziele an Planung, Entwicklung und Evaluierung wurden damit erfüllt.

Zur Erreichung dieser Ziele wurde die erhaltene Zuwendung sinnvoll eingesetzt. Sensoren zur Erkennung schwacher Verkehrsteilnehmer wurden frühzeitig evaluiert, sodass die Entscheidung auf die Anschaffung eines Radarsensors fiel. Ebenso wurden Geräte zur Car2X-Kommunikation beschafft und evaluiert.

Erst mithilfe der Zuwendung konnte ein Projekt dieser Dimension erfolgreich durchgeführt werden, schließlich erforderten die Bearbeitung sowie die ausgiebigen Tests einen nicht unerheblichen zeitlichen Aufwand. Dafür wurde am ifak Know-how auf den bearbeiteten Gebieten (Car2X, Sensorik, mobile Anwendungen...) geschaffen bzw. angereichert. Dadurch hat das ifak seine eigene Kompetenz im Verkehrsbereich stärken können. Darüber hinaus wurden und werden die Ergebnisse publiziert und aktiv nach einer Verwertung gesucht, damit auch Unternehmen, Städte sowie Bürger profitieren.

## **2.11 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Mit XCYCLE [12] startete im Juni 2015 ein EU-Projekt im Rahmen von Horizon 2020, das ähnliche Ziele wie die Radfahrer-Schutzeinrichtung aus UR:BAN besitzt. Es soll ebenfalls eine infrastrukturseitige Lösung zum Einsatz kommen, um in erster Linie die Sicherheit von Radfahrern zu erhöhen. Dabei sollen auch kooperative Technologien eingesetzt werden. Ob damit vorrangig Car2X gemeint ist, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden. Da jedoch das DLR und die Stadt Braunschweig involviert sind, in der eine großräumige Car2X-Teststrecke existiert, darf davon ausgegangen werden.

Darüber hinaus soll der Komfort gesteigert werden, indem Lichtsignalanlagen auf Radfahrer reagieren und sie zu weniger Rotverstößen verleiten sowie die Reisezeit verringern.

Zu dieser Zeit liegen noch kaum Erkenntnisse aus dem XCYCLE-Projekt vor, lediglich ein paar veröffentlichte Paper. Scheinbar ist geplant, den Car2X-CAM-Standard zu erweitern, um für mit Car2X ausgerüsteten Fahrrädern eine Richtungsinformation bereitzustellen.

In UR:BAN wurden Radfahrer bewusst nicht mit Car2X-Technologie ausgestattet, da nicht sicher ist, dass dies irgendwann in großem Maße für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer genutzt wird. Stattdessen wurden Smartphones genutzt, die bereits heute viele Menschen besitzen, sodass eine Integration in das kooperative System per Handy-App als viel wahrscheinlicher angesehen wird, als ein Fahrrad Car2X-fähig zu machen. Zudem wird die

Erweiterung des CAM-Standards als kritisch angesehen, da für eine Markteinführung diese Änderung in den offiziellen ETSI-Standard übernommen und von Geräte-Herstellern implementiert werden müsste. In UR:BAN wurde dagegen darauf abgezielt, sich an den bestehenden Standard zu halten, um sich nahtlos in kooperative Systeme integrieren zu können.

## 2.12 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Mit der Radfahrer-Schutzeinrichtung wurde erstmalig untersucht, wie schwache Verkehrsteilnehmer in ein kooperatives, intelligentes Verkehrssystem integriert werden können, um die allgemeine Verkehrssicherheit zu erhöhen. Das vorrangige Ziel war damit die Verringerung von Unfällen mit Personenschaden. Darüber hinaus werden sich querende Verkehrsteilnehmer wie KFZ und Radfahrer frühzeitig aufeinander aufmerksam gemacht, sodass verspätetes Erkennen und notwendige Gefahrenbremsungen reduziert werden. Dies hat somit auch positive Effekte auf den Verkehrsfluss und eine Verringerung von Auffahrunfällen aufgrund plötzlicher Bremsmanöver im Kreuzungsbereich. Auf lange Sicht kann solch ein System zum Schutz von Radfahrern das allgemeine Sicherheitsgefühl und damit die Attraktivität des Radfahrens stärken.

Für die Durchführung des Projektes wurden allgemeine Konzepte erarbeitet, die sich für Folgeprojekte und zum Einsatz in beliebigen Städten nutzen lassen. Zu den wichtigsten Ergebnissen zählen:

- Sammlung und Auswertung von Anwendungsfällen (Use Cases), in denen eine Schutzeinrichtung auf Basis einer Infrastrukturkomponente, Sensoren, Car2X sowie WLAN-fähigen Smart Devices vor Unfällen schützen kann. Die Anwendungsfälle beziehen sich auf allgemeine städtische Kreuzungen mit Radverkehr und abbiegenden KFZ. Die Erkenntnisse lassen sich auf weitere Städte übertragen, um die dortige Einrichtung einer ähnlichen Schutzeinrichtung zu diskutieren und den Nutzen abschätzen zu können.
- Konzipierung der Gesamtarchitektur einer Schutzeinrichtung, bestehend aus kommunizierenden Verkehrsteilnehmern und einer Road Side Unit auf Infrastruktureseite. Dabei wurden nötige Geräte, Standards und Abläufe identifiziert, die bei der Weiterentwicklung des Konzept enorm hilfreich sind.
- Identifizierung von Parametern, die für eine Kollisionsvorhersage von Verkehrsteilnehmern zu sammeln sind. Vor allem für Car2X-CAMs bietet dies die Grundlage, standardbasiert Informationen zu sammeln und zentral auszuwerten. Die Erkenntnisse lassen sich für verschiedenste Car2X-Applikationen nutzen, die zukünftig als Dienst von Road Side Units angeboten werden.
- Identifizierung von Parametern, die für eine Kollisionswarnung zu übertragen sind. Vor allem für Car2X-DENMs bietet dies die Grundlage, standardbasiert Informationen bereitzustellen, auf die Fahrzeug-OEMs individuell reagieren können.

- Evaluierung von für Radfahrer ansprechenden Methoden zur Warnung vor Gefahren im Straßenverkehr. Eine interaktive Simulation sowie Nutzerbefragung untersuchten, welche Warnmethoden (Smartphone, Vibration, Datenbrille...) Radfahrer bevorzugen würden. Die Akzeptanz zur Zusammenarbeit mit der Schutzeinrichtung ist schließlich essentiell für eine Markteinführung. Es stellte sich heraus, dass die für die Demonstration gewählte Lösung eines Smartphones am Fahrradlenker eher weniger favorisiert wird, sodass Anschlussprojekte dies angehen müssen. Zudem sehen Nutzer die Preisgabe der eigenen Bewegung und damit persönlichen Daten als kritisch, sodass Folgeprojekte ebenfalls den Datenschutz berücksichtigen müssen.
- Untersuchung, wie über WLAN-Daten und Radare schwache Verkehrsteilnehmer erfasst und anderen Applikationen bereitgestellt werden können.

### Zielgruppen und Zielmärkte

Direkt profitieren gefährdete schwache Verkehrsteilnehmer (Radfahrer, Fußgänger), deren Sicherheit an Ampelkreuzungen erhöht wird. Sie werden an innovativen Lösungen interessiert sein, von motorisierten Verkehrsteilnehmern früher und in jedem Fall beachtet zu werden.

Ebenfalls profitieren Autofahrer, die sicherlich Unfälle mit Radfahrern etc. vermeiden wollen. Fahrerassistenzsysteme erleichtern bereits seit Jahren die Orientierung und erhöhen die Sicherheit. Die Schutzeinrichtung wird sich hier nahtlos integrieren können, um als weitere Informationsquelle, zusätzlich zu Onboard-Sensoren, dienen zu können.

An der Senkung von Unfallzahlen sind neben den direkt Betroffenen vor allem Städte und (Bundes-) Regierung interessiert. Auf Landes- und Bundesebene wird es in Zukunft immer mehr Programme geben, die Radverkehr und in diesem Zuge die Sicherheit stärken sollen, um Städte von Verkehr und Umweltverschmutzung zu entlasten. Städte und Kommunen werden im Zuge der Einführung von Car2X-Applikationen die entscheidende Stelle sein, um entsprechende Infrastruktur zu installieren und Dienste bereitzustellen.

Letztendlich bestehen die Zielmärkte aus den Anbietern von Hardware- und Softwarelösungen, Städten sowie Endanwendern:

- Hersteller von Road Side Units und Lichtsignalanlagen werden im Zuge der Einführung von Car2X ebenfalls entsprechende Dienste anbieten wollen
- Fahrzeughersteller werden mit der Einführung von Car2X Dienste nutzen wollen, die infrastrukturseitig angeboten werden
- Hersteller von Fahrrädern oder Equipment wie Fahrradcomputern und intelligenten Helmen werden mit der Integration kooperativer Anwendungen mehr Kaufargumente liefern wollen

- Endanwender wie Radfahrer und Autofahrer werden Unfälle im Straßenverkehr vermeiden wollen und daher die Anschaffung neuer Geräte (kooperatives Fahrrad-Zubehör, Car2X-Upgrade im KFZ...) in Erwägung ziehen

### **Einschätzung der Entwicklung der Marktsituation (Trendprognose)**

Die weitere Entwicklung hängt stark von der Einführung von Car2X/WLANp ab. Fahrzeug-OEMs müssen diese Technik integrieren und ein vernünftiges Bezahlmodell finden. Bisher ist unklar, ob und wann Car2X zur Serienausstattung wird, noch lange ein optionales Feature für Neuwagen bleibt oder nur in Oberklasse-Fahrzeugen verbaut wird, um die Kosten zu decken. Erst nach der Einführung von Day1-Applikationen (Car2Car) werden Infrastruktur-Applikationen (Radfahrer-Schutzeinrichtung, Ampelassistent...) mehr und mehr eingeführt. Kritisch ist der Wille von Städten, entsprechende Infrastruktur zu beschaffen, zu installieren und auch langfristig zu betreiben. Sobald aber an kritischen Verkehrsknoten Infrastruktur vorhanden ist und erste Applikationen bzw. Dienste angeboten werden, hat die Radfahrer-Schutzeinrichtung sehr gute Chancen, sich nahtlos in diesen Kontext zu integrieren.

Basierend auf den Erfahrungen aus dem Projekt sind die Lösungen zuerst am wahrscheinlichsten, die KFZ per Car2X und schwache Verkehrsteilnehmer über infrastrukturseitige Sensorik erfassen. Erste Städte werden als Vorreiter die Schutzeinrichtung installieren, eventuell in Kooperation mit LSA-Herstellern. Ein ähnliches Beispiel ist die „Grüne Welle“ für Radfahrer, die die Stadt München in Kooperation mit Siemens anbietet. Ähnlich könnte es beim Radfahrerschutz geschehen.

Die Integration der schwachen Verkehrsteilnehmer über Smartphones bzw. allgemein über Smart Devices ist noch nicht gut abschätzbar. Für eine Markteinführung muss der Datenschutz geklärt und die robuste Übertragung von Daten an die Schutzeinrichtung sichergestellt werden.

### **Nutzen der Radfahrer-Schutzeinrichtung zum Bereitstellen von Verkehrsinformationen**

Über das Ziel der erhöhten Sicherheit hinaus können Daten über detektierte Verkehrsteilnehmer anderen Applikationen zur Verfügung gestellt werden. Dies wurde im Projekt durch die Weitergabe von Radardaten zur Verkehrszählung und letztendlich Rückstauschätzung für die TU Braunschweig demonstriert. Weitere Quellen sind WLAN- und Car2X-Daten, die vor allem Positionsdaten enthalten. Diese Informationen können weiteren Diensten bereitgestellt werden. Sei es direkt an der Kreuzung für weitere Fahrerinformations- und Assistenzsysteme oder in Verkehrsleitzentralen. Beispielsweise kann die Verkehrsdetektion durch Car2X die Detektion über Induktionsschleifen ergänzen und ein besseres Bild über Verkehrsdichte und -fluss liefern, um über dynamische Verkehrsführung (Wechselschilder etc.) überfüllte Kreuzungen zu entlasten.

### 3 Kooperative Schutzeinrichtung – KSE

#### 3.1 Motivation, Ausgangslage und Ziele

Während der Projektlaufzeit ereigneten sich in den Jahren von 2012 bis 2014 in Deutschland 13906 Baustellenunfälle mit Personenschaden. 106 Getötete und 2011 Schwerverletzte zeigen eine traurige Bilanz [13], die aufzeigt, dass auch heute noch trotz Sicherung der Baustellenbereiche, Unfallzonen und generell kurzfristig abgesperrten Verkehrsbereiche diese massive Gefahrenzonen des Straßenverkehrs darstellen.

Gerade für die Sicherheit von Hilfskräften vor Ort, aber auch generell für alle betroffenen Verkehrsteilnehmer sind aktuelle und ortsgenaue Informationen über Störungen und Behinderungen maßgeblich. Gerade kurzfristig auftretende Störungen, wie etwa Sperrungen auf Grund von Unfällen, Mäharbeiten oder Tagesbaustellen haben oft massive Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen und stellen selbst eine Sicherheitsgefahr dar, etwa durch Folgeunfälle. Sperr- und Baustellenbereiche werden sehr oft zu Gefahrenstellen, gerade wenn sie sich außerhalb des Sichtbereiches befinden, etwa hinter Kurven, oder die Sicht durch Dunkelheit oder Nebel schlecht ist.

Aktuell erfolgt die Information über Verkehrsstörungen über Broadcastmedien wie Radio oder TMC. Dies hat zur Folge, dass die Informationen praktisch immer mit zeitlichem Verzug, unspezifisch in ihrer Beschreibung und ohne präzise Verortung ausgegeben werden. Meist erfolgt gar keine Meldung an Verkehrsteilnehmer, wenn kurzfristige Verkehrsstörungen in Städten oder auf Landstraßen statt auf Autobahnen auftreten, weil notwendige Detektoren fehlen.

Für den Verkehrsteilnehmer hat dies zur Folge, dass er nur begrenzten Bezug zwischen der Position der Störstelle und der eigenen Position bzw. seiner Route herstellen kann und so meist keine oder lediglich unzureichende Handlungsempfehlungen, etwa zum Umfahren des Bereiches, erhält. Durch den zeitlichen Verzug erreichen den Verkehrsteilnehmer diese Handlungsempfehlungen darüber hinaus oft zu spät.

Durch die begrenzte Genauigkeit der Informationen zu Ort, Zeit und Ausmaß der Verkehrsstörung sind die aktuellen Möglichkeiten verkehrs- und rettungsdienstlicher Dritter, wie etwa Rettungsdienste, Einsatzkräfte oder Verkehrsmanagementzentralen, noch sehr beschränkt, wenn es darum geht, sich auf die lokalen Verkehrsstörungen einzustellen.

Zusammengefasst stellt sich die Situation bezogen auf kurzfristige und unvorhersehbare Störungen im Straßenraum für den Verkehrsteilnehmer aktuell etwa wie folgt dar:

- oftmals gar keine Meldung,
- Meldung meist nur über Broadcastmedien (Radio, TMC),
- Meldung mit zeitlichem Verzug,
- keine Vernetzung mit Rettungs-/Einsatzkräften, VMZ,
- kein Bezug zwischen Position der Störstelle und der eigenen Position bzw. Route,
- Wenn überhaupt, dann nur sehr unspezifische Informationen über die Störung/Beeinträchtigung (geringe Akzeptanz beim Verkehrsteilnehmer),

- keine oder nur oft nur unzureichende Handlungsempfehlungen (z. B. „Umfahren Sie den Bereich“ etc.),
- keine Handlungsalternativen,
- oftmals keine Information bei Beseitigung der Störung

Gefahren welche im Straßenbereich von Sperrungen und Baustellen auftreten können sind:

- Eingeschränkte Sicht auf Straßen durch Sperrungen von Straßenabschnitten
- Langsam fahrende oder blockierende Baustellenfahrzeuge oder Mähmaschinen im Einsatz
- Liegegebliebene oder verunfallte Fahrzeuge/Personen

Mit der hier beschriebenen Applikation der Kooperativen Schutzeinrichtung wird die Sicherheit von Sperrbereichen durch vor Ort automatisiert erhobene und kommunizierte Informationen erhöht. Informationen zu den Umständen, Zeiten und Ausmaßen der Störungen werden im Nahbereich und für Zentralen zur Verfügung gestellt.

Der Leitkegel ist selbstverortend, aktiviert sich beim Aufstellen durch Hilfs- und Servicekräfte (Polizei, Straßendienst) selbständig und gibt seine Gefahrenwarnung im Nah- und Fernbereich aus. Im Falle der Auflösung der Sperrung wird die Gefahrenmeldung automatisch eingestellt und der Leitkegel meldet sich ab. Die Verortung, Aussendung und Abmeldung der Warnnachrichten erfolgt automatisiert und ist in den Ablauf der Sicherung von Unfall- oder Baustelle eingebettet. Die verkehrliche Sicherheit wird sowohl für Hilfs- und Servicekräfte als auch Verkehrsteilnehmer erhöht indem Folgeunfälle und unübersichtliche Verkehrssituationen etwa durch Straßenarbeiten vermieden und entschärft werden. Gleichzeitig wird ein Mehrwert an nachhaltigen und umfassend nutzbaren Informationen geschaffen. Durch den Intelligenten Leitkegel kann so ein wichtiger Beitrag für die Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr geleistet werden.

### **Ziele der Applikation SK-35:**

Die Applikation Kooperative-Schutzeinrichtung stellt zeitnahe und ortsbezogene Informationen über nicht geplante, unvorhersehbare Hindernisse (Baustellen, Unfälle, Sperrungen) bereit und soll somit vorrangig der Erhöhung der Verkehrssicherheit dienen.

Weiterhin werden in nicht planbaren, plötzlich auftretenden Situationen Informationen benötigt, da ein geringer Grad an Informiertheit vorliegt. Schnelle Information bei Unfällen oder Störfällen rettet Leben und minimiert Unfallfolgen.

Daten zu Ereignissen besitzen eine umso größere Bedeutung, je weniger vorhersehbar eine bestimmte Situation ist.

Die wesentlichen Ziele der Applikation könne wie folgt zusammengefasst werden:

- Erhöhung der Verkehrssicherheit in Störstellenbereichen (für Einsatzkräfte und Verkehrsteilnehmer)
- Entwicklung und Erprobung von autonomen Einrichtungen (Leitkegel, Baken,...) zur Unfallstellensicherung
- Schnellere Erfassung von Unfallorten und Störstellen im Verkehr

- Höhere Qualität und Verfügbarkeit der Unfalldaten durch Vermeidung von Mehrfachbearbeitung (Papier – PC)
- Bereitstellung von zeitnahen und ortsbezogenen Informationen über nicht geplante, unvorhersehbare Hindernisse (Baustellen, Unfälle, Sperrungen) auch für andere Anwendungen bzw. Assistenzsysteme
- Online-Datenübertragung in Warn-, Leitsysteme und Fahrzeuge

Der Erhöhung der Verkehrssicherheit wird hierbei eine Bedeutsame Rolle zu teil.

### **Sicherheitsoptimierung für Verkehrsteilnehmer**

Eine zeitnahe Weitergabe von spezifischen Verkehrswarnungen, wie sie der intelligente Leitkegel automatisiert in sein Umfeld kommunizieren kann, besitzt auf Grund seiner genauen Verortungsparameter einen großen Mehrwert für alle Verkehrsteilnehmer. Durch für sicherheitskritische Nachrichten geeignete Übertragungsmöglichkeiten wie etwa des WLAN-Standards IEEE 802.11p direkt in die Fahrzeuge hinein, können zukünftige Fahrassistenzsysteme und ihre Aktorik den Verkehrsteilnehmer viel schneller akustische und visuelle Warnhinweise geben und so frühzeitig auf Gefahrensituationen hingewiesen werden. Die sonst erst durch optisch wahrzunehmende Sperreinrichtungen direkt, und oft zu spät, am Ort der Gefährdung wahrzunehmende Gefahrenhinweise können so im Nahbereich von ca. 500-1000m im Umkreis der Gefährdung kommuniziert werden.

### **Sicherheitsoptimierung für Rettungs- und Servicekräfte**

Durch den Einsatz der KSE respektive des Intelligenten Leitkegels kann die Sicherheit von Rettungs- und Servicekräfte im Umfeld der Gefahrenstelle verbessert werden. Verkehrsteilnehmer können direkt über am Einsatzort befindliche Rettungs- und Bergungskräfte informiert werden. Aber auch im Rahmen von Baustellen, können die Mitarbeiter der Kommunen und Straßenbaulastträger geschützt werden, indem Verkehrsteilnehmer im Umfeld von Baustellen oder Mäharbeiten auf die Situation angepasste Geschwindigkeiten, oder große, mitunter die Fahrbahnen blockierende Fahrzeuge hingewiesen werden. Dies bedeutet für die Einsatzkräfte eine erhöhte Betriebssicherheit.

Aber auch durch eine zeitnahe Übertragung der Daten der Stör- oder Unfallstelle wie etwa Zeit, Position, Kennung usw.) an organisatorische Leitstellen kann die Sicherheit des eingesetzten Hilfs- und Servicepersonals verbessern, indem eine verbesserte Planung und Information der Einsatzkräfte vor Ort erreicht werden kann.

Weil der Intelligente Leitkegel eine automatisierte Informationserhöhung innerhalb Standardvorgehensweisen der Einsatzkräfte ermöglicht, werden diese in ihrer Arbeit insgesamt entlastet. Durch die verbesserte Datenaufnahme des Einsatzes (Wo, Was, Wann, Wie lange) und deren Bereitstellung können so auch zukünftig Dokumentationsabläufe der Rettungs- und Servicekräfte unterstützt und optimiert werden. Durch genaue



Positionsbestimmungen können nachträgliche Georeferenzierung insgesamt die Arbeit der Service- Hilfs- und Rettungskräfte, wie etwa auch des Technischen Polizeiamtes erleichtern.

### **Sicherheitsoptimierung durch Verkehrsbeeinflussung**

Von den zeit- und ortskritischen Informationen im Nahbereich der Sperrstelle können auch langfristige und umfassendere Optimierungen und Sicherheitsvorkehrungen durch die Informationen des Warnkegels geleistet werden.

So können Informationen über Sperr- und Gefahrenbereiche den Verkehrsteilnehmer zur Planung oder Veränderung ihrer Routen z.B. für Navigationsgeräte, über Internet, Radio (TMC), Leitsystemen, Assistenzsystemen oder Navigationssystemen zur Verfügung gestellt werden. Die Verkehrsteilnehmer können dann mittels der Information die Störungen oder Sperrungen umfahren.

Das Verkehrs- und Flottenmanagement verschiedenster Institutionen kann die gesammelten Informationen der Intelligenten Leitkegel nutzen und ihre Einsätze zu optimieren oder schneller auf Gefahrensituationen reagieren zu können.

Ebenso kann das städtische Verkehrsmanagement auf Basis dieser Daten optimierende Eingriffe in die Verkehrssteuerung (z.B. Ampelanlagen oder ÖV-Betrieb) vornehmen um die Verkehrsströme zu lenken. Durch umfassendere Informationen der Verkehrsteilnehmer über Ursachen, Prognose und Alternativen der Verkehrslage und -routen können Akzeptanzsteigerungen des Verkehrsmanagements begünstigt werden.

### **Potenzielle Anwendungen der Kooperativen Schutzeinrichtung:**

Zusammenfassend sollen nachfolgend nochmal die wichtigsten, potenziellen Anwendungen der KSE stichpunktartig aufgeführt werden:

- Online-Unfalldatenerfassung (Verortung, Fotos, Unfalldaten, Protokolle, Authentifizierung,...)
- Online-Übermittlung an VM-Zentrale für die Integration in Verkehrslage, Landesmeldestellen
- Unmittelbare und authentifizierte Gefahrenwarnung für nachfolgende Verkehre
- Straßenverkehrssicherheit,
- Sicherheit bei Arbeiten an Unfall- und Störstellen
- Verkehrs- und Flottenmanagement
- Übertragung der Daten der Stör- oder Unfallstelle (Zeit, Position, Kennung usw.) an Leitstellen
- Verbreitung der Informationen im Internet, Radio(TMC), Leitsystemen, Assistenzsystemen, dynamische Navigation
- Warnung der Verkehrsteilnehmer (Pre-Trip, On-Trip)

## **3.2 Übersicht und Darstellung**

Die SK 35 - Kooperative Schutzeinrichtung (KSE) ist eine verteilte Anwendung, die sich im Wesentlichen in vier Hauptkomponenten unterteilen lässt. Bei diesen Komponenten handelt es sich um den Intelligenten Leitkegel (IL), den Hard- und Softwarekomponenten des

Konfigurations- und Ladeterminals, welche sich auf dem Einsatzfahrzeug befinden und die Versorgung des IL gewährleisten, der eigentlichen KSE-Softwareapplikation, die auf dem Leitkegel-Server ausgeführt wird sowie der Road Side Unit (RSU), die die Informationen vom Leitkegelserver entgegen nimmt, dekodiert, auswertet und per Funk an die Verkehrsteilnehmer verteilt. Eine Übersicht der beteiligten Komponenten der KSE gibt Abbildung 26

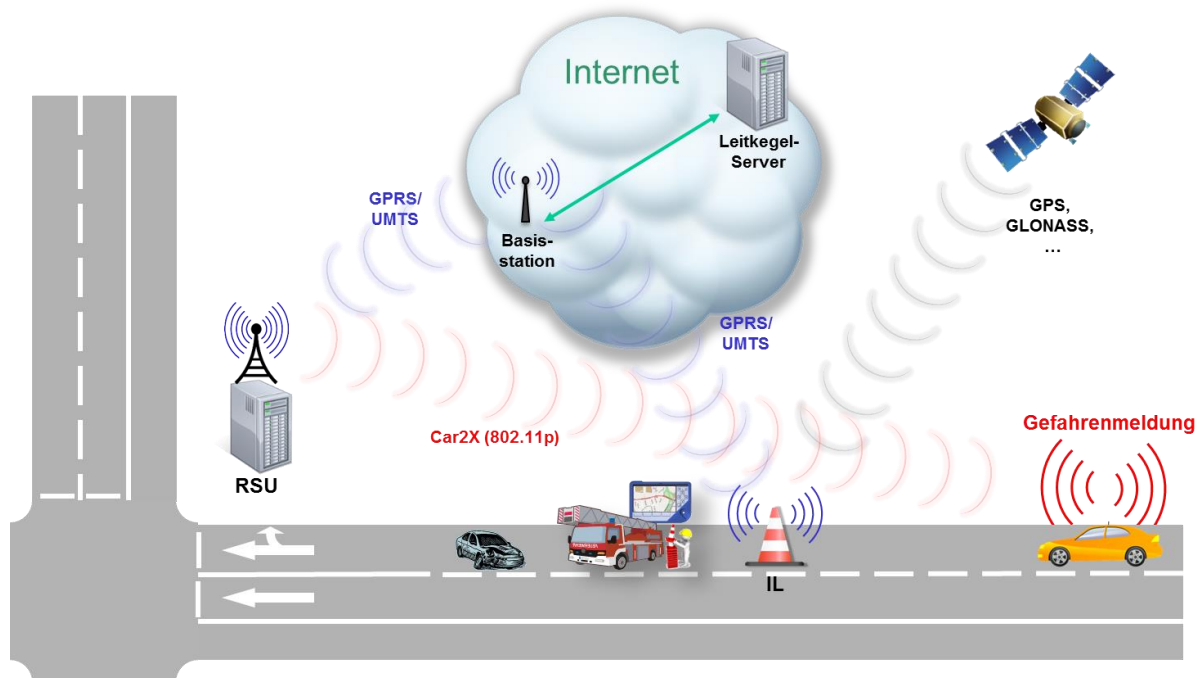


Abbildung 26: Systemkomponenten der KSE.

Die Funktionsweise der KSE lässt sich wie folgt beschreiben. In der Konfigurationsphase werden die Daten bezüglich der Art der Störung vom Bediener der KSE über ein möglichst robustes und leicht bedienbares MMI eingegeben. Sofort nach dem Aufstellen des IL wird dieser automatisch aktiviert und erfasst ortsbezogene Informationen (Pos., Fahrstreifen, ...), welche zusammen mit den Informationen über die Art der Störung, Grad der Beeinträchtigung, ..., über eine Mobilfunkverbindung an den Leitkegel-Server übermittelt werden. Eine Softwareanwendung auf dem Leitkegel-Server (KSE-Applikation) wertet die empfangenen Informationen eines oder mehrerer IL aus, erzeugt daraus eine Störungsinformation und überträgt diese an die zuständige RSU. Die RSU wiederum erzeugt aus den Störungsinformationen kollektive Gefahrenmeldungen, die sie per Dedicated Short Range Comunikation DSRC-Funk an die Verkehrsteilnehmer sendet. An der Smarten Kreuzung in UR:BAN fand hierfür der Automotive WLAN ITS-G5 Standard Anwendung [14]. Die Deaktivierung der KSE bewirkt die Informierung aller beteiligten Applikationen und Verkehrsteilnehmer über die Beseitigung der Störung. Auch das Versenden der Gefahrenmeldungen wird nach der Deaktivierung eingestellt und die Straße bzw. Kreuzung verbleibt in ihrer Ausgangskonfiguration. Die einzelnen Schnittstellen und das

Kommunikationsschema der KSE, wie es in UR:BAN z.B. im Prüffeld Braunschweig und im Testfeld Düsseldorf realisiert wurde, sind in Abbildung 27 dargestellt.

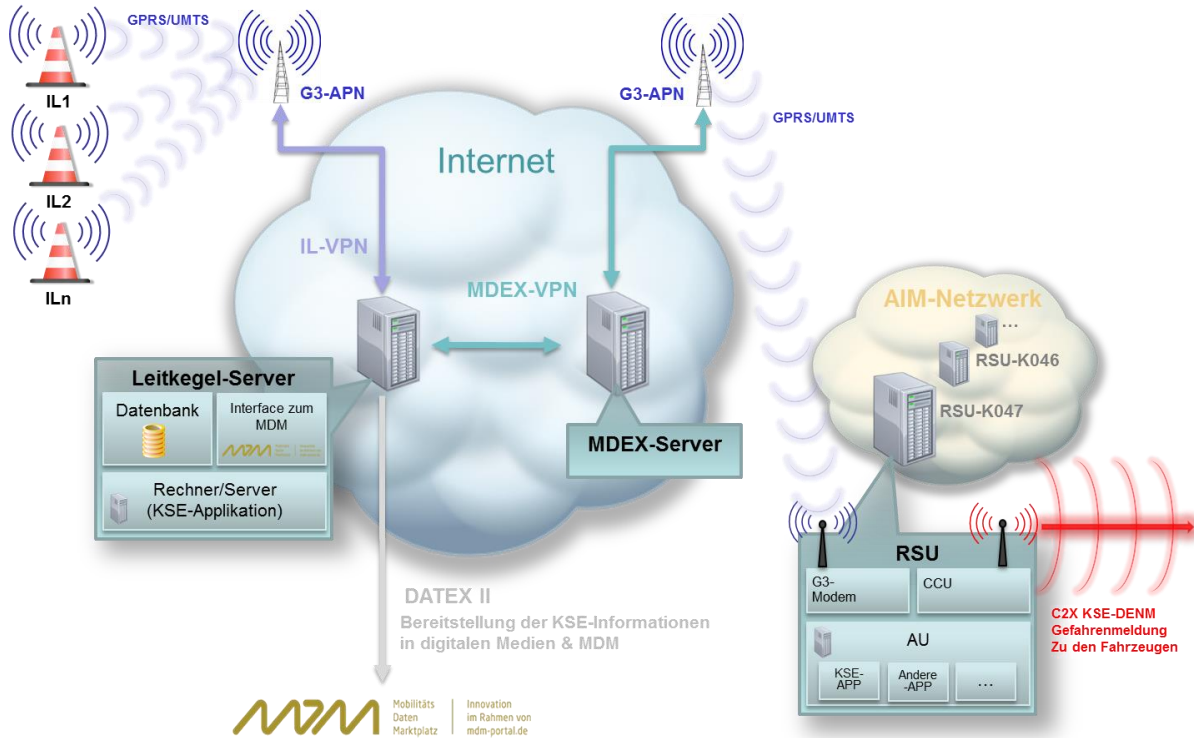


Abbildung 27: Schnittstellen und Kommunikationsschema der KSE, wie es im Forschungsvorhaben in den Prüf- und Testfeldern realisiert wurde.

### Use-Cases der Applikation SK-35

In der Spezifikationsphase (AP2000) wurden für die hier vorgestellte Applikation die relevanten Use-Cases definiert und im Meilensteinbericht 1 zusammen mit den beabsichtigten verkehrlichen und ökologischen Wirkungszielen niedergeschrieben.

Für die Anwendung SK35 „Kooperative Schutzeinrichtung – Intelligenter Leitkegel“ wurden im Wesentlichen zwei Use-Cases identifiziert, die als Grundlage für die Realisierung dienen sollen. Bei diesen Use-Cases handelt es sich zum einen um den Use-Cases „Aktivierung der KSE im Kreuzungsbereich“ SK-35-1 und zum anderen um den Use-Case „Deaktivierung der KSE im Kreuzungsbereich“ SK-35-2, wie auch schon der Anwendungsbeschreibung zu entnehmen ist. Im Spezifikationsdokument des Meilensteinberichts 1 wurden dann die genannten Use-Cases beschrieben und mit entsprechenden. Komponenten- und Sequenzdiagrammen weiter konkretisiert. Weiterhin wurden die applikationsrelevanten Schnittstellen identifiziert und spezifiziert, sowie wichtige Interdependenzen der Applikationen untereinander aufgezeigt.

## Schnittstellenspezifikation

In Tabelle 8 ist ein Überblick über die durch die Anwendung SK-35 verwendeten Schnittstellen gegeben. Da den Schnittstelle eine zentrale Rolle bei der Realisierung der Applikation Kooperative Schutzzeineinrichtung, besonders im Zusammenspiel mit anderen Applikationen der Smarten Kreuzung zukommt, soll hier eine kurze Beschreibung der applikationsrelevanten Schnittstellen an der RSU der Smarten Kreuzung erfolgen und ggf. auf Besonderheiten eingegangen werden, insofern diese für ein eingehenden Verständnis der Applikation von Bedeutung sind.

**Tabelle 1: Schnittstellen der KSE an der RSU der Smarten Kreuzung**

Schnittstellen SK-35	RSU In/Out	Bemerkung
I.UMTS.IL-Daten.RSU.in	In	-Download der SK35-DENM (XML-File durch den Leitkegel-Server)
I.UMTS.IL-Daten.RSU.out	Out	-Upload von TOPO-Daten (XML-File zum Leitkegel-Server)
I.Car2X-RSU.out	Out	-Versendung von DEN-Nachrichten im Störfall (Baustelle, Unfall, ...) -Versendung von DEN-Nachrichten bei Aufhebung der Störung
I.UMTS.dGNSS-Daten.RSU.out	Out	-Korrekturdaten für die Rover (IL) im RTCM3-Format bei Verwendung der RSU als DGNSS-Basisstation

### I.UMTS.IL-Daten.RSU.in

Über diese Schnittstelle überträgt der Leitkegel-Server die zuvor berechneten Störstelleninformationen an die RSU, welche die Daten dekodiert, verarbeitet und über die Schnittstelle I.Car2X-RSU.out (siehe unten) an die Verkehrsteilnehmer versendet. Als Protokoll und Programm für die sichere Übertragung der KSE-Daten an die RSU, kommt hier scp zum Einsatz. Die Daten der Störstelle werden in einer XML-formatierten Datei, in einem festgelegten Ordner (Shared-Folder) auf der RSU abgelegt.

Besonderheiten und Voraussetzungen für die Schnittstelle I.UMTS.IL-Daten.RSU.in:

- Für den Dateiapload via scp muss ein Nutzeraccount mit entsprechenden Rechten (Schreibrechten für den Shared-Folder) auf der RSU eingerichtet sein.
- Der scp-Dienst muss auf der RSU installiert und konfiguriert sein
- ggf. muss die Firewall den scp-Dienst erlauben

### **I.UMTS.IL-Daten.RSU.out**

Über die Schnittstelle I.UMTS.IL-Daten.RSU.out lädt der Leitkegel-Server nach erfolgreichem Verbindungsaufbau TOPO-XML-Datei von der RSU herunter, dekodiert dieses und verwendet die Daten für den Fahrstreifen-Matching-Algorithmus (siehe auch Abschnitt 3.4). Für den Upload der XML-Datei zum Leitkegel-Server wird wieder das scp-Protokoll verwendet. Voraussetzungen für diese Schnittstelle sind die gleichen wie für die Schnittstelle I.UMTS.IL-Daten.RSU.in (siehe oben)

### **I.Car2X-RSU.out**

Die zuvor vom Leitkegel-Server über die Schnittstelle I.UMTS.IL-Daten.RSU.in übertragenen Daten der Störstelle (siehe oben), werden durch den Basisdienst RSU (SK20) ausgewertet und bei Korrektheit in eine C2X-Nachricht des Typs DENM verpackt. Diese „KSE-DENM“ wird dann zyklisch, alle Sekunde, über die CCU an die Verkehrsteilnehmer gesendet. Die Versendung der DENM erfolgt so lange, wie die entsprechende XML-Datei im Shared-Folder existiert.

### **I.UMTS.dGNSS-Daten.RSU.out**

Über diese Schnittstelle werden die Korrekturdaten, die von der RSU nach dem DGNSS-Verfahren erzeugt werden, an den Leitkegel-Server über die UMTS-Datenverbindung übertragen und von dort an die einzelnen Rover (IL) verteilt, die ihrerseits mit den Korrekturdaten eine genaue Positionslösung berechnen können (siehe auch Abschnitt 3.8). Als Austauschformat wird das standardisierte Format RTCM3 (Radio Technical Commission for Maritime Services) verwendet. Auch hierbei zeigt sich der Ansatz, die einzelnen Leitkegel über einen zusätzlichen Leitkegel-Server zu verwalten, als sehr vorteilhaft, da über die Schnittstelle I.UMTS.dGNSS-Daten.RSU.out die Korrekturdaten für alle IL nur einmal übertragen werden müssen und somit Datenvolumen für die Mobilfunkverbindung eingespart werden kann.

Besonderheiten und Voraussetzungen für die Schnittstelle I.UMTS.dGNSS-Daten.RSU.out:

Der Korrekturdatenaustausch erfolgt nach dem Client-Server-Prinzip. Dabei übernimmt die RSU die Rolle des Servers und stellt die entsprechenden Daten auf einem zu konfigurierenden Port bereit. Für diesen Port muss ggf. eine Portfreigabe in den Firewall-Einstellungen der RSU berücksichtigt werden.

### 3.3 Intelligenter Leitkegel

Verkehrsleitkegel zählen zu den Verkehrseinrichtungen nach Straßenverkehrsordnung (Zeichen 610 gemäß § 43 StVO i. V. m. Anlage 4). Grundsätzlich besteht der Leitkegel aus einer stabilen Fußplatte und einem aufgehenden konisch geformten Körper. Die Fußplatte ist deutlich breiter und schwerer als der aufgehende Körper. Durch diesen tieferen Schwerpunkt wird die Gefahr reduziert, dass der Kegel kippt oder verrutscht. Aus der Verwaltungsvorschrift StVO (VwV-StVO) ergibt sich die Maßgabe, dass sie voll retroreflektierend ausgeführt sein müssen. Es dürfen daher im Anwendungsbereich von StVO, den Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA 95) [15] und den Technischen Lieferbedingungen für Leitkegel (TL-Leitkegel) [16] nur Leitkegel zum Einsatz kommen, bei denen beide Farben (Rot und Weiß) retroreflektierend ausgeführt sind, um die erforderliche Tag- / Nachtgleichheit zu gewährleisten.

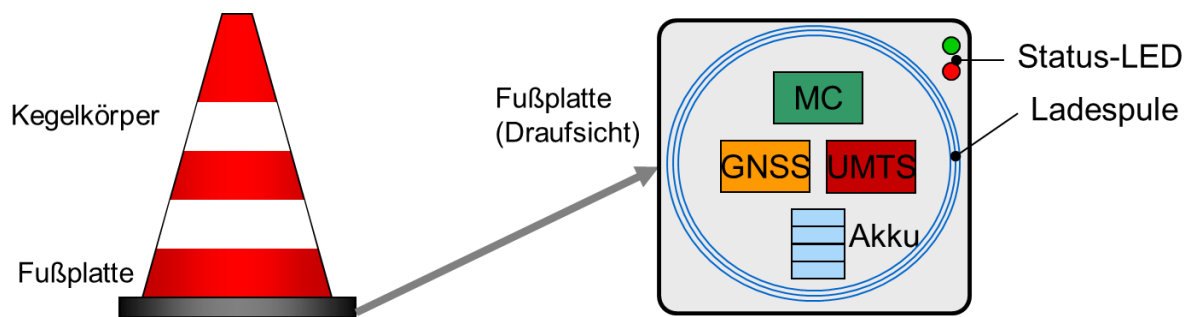


Abbildung 28: Grobkonzept des Intelligenten Leitkegels

Der Leitkegel muss bestimmten mechanischen Anforderungen entsprechen (Größe, Höhe, farbliche Gestaltung, reflektive Eigenschaften, überfahrtsicher, etc.). Dies muss bei der Integration unbedingt berücksichtigt werden. Hieraus ergeben sich verschiedenen Anforderungen für die mechanische Integration. Da der eigentliche Kegelkorpus abfahrbar bzw. überfahrbar sein muss, kann er nur bedingt oder gar nicht für die Integration der IL-Komponenten genutzt werden. Somit müssen alle Baugruppen in der Fußplatte des Leitkegels integriert werden. In Abbildung 28 ist eine mögliche und angestrebte Komponentenintegration modelliert.

#### Zu berücksichtigende Normen und Regelungen

Bei der Konzeptionierung, der Spezifikation und dem Betrieb der KSE bzw. des IL mussten darüber hinaus insbesondere die folgenden Normen und Regelungen berücksichtigt werden:

- Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA) [17]
- Richtlinien für Streckenarbeiten (RSA-95) [15]
- DIN EN 13422:2009-08
- EMV, elektromagnetischen Umweltverträglichkeit (EMVU)

### **Komponentenintegration und funktionale Anforderungsanalyse an den IL**

Hieraus ergeben sich die wichtigsten funktionalen Anforderungen für den Betrieb des IL im Straßenraum wie folgt:

- Kegelkörper und Fußplatte sind trennbar (Überfahung möglich),
- stapelbar,
- robust und schockresistent,
- Abmessungen,
- Wahrung farblicher und reflektiver Eigenschaften,
- Wetterfestigkeit (min. IP67),
- Vermeidung offener Kontakte,
- Temperaturfestigkeit (-40 – 85°C),
- autarker Betrieb (Akkuversorgt),
- „unauffällig“

Neben den oben genannten funktionalen Anforderungen sei hier auch noch die wichtige Forderung nach einem geringen Stückpreis für den IL erwähnt. Diese stellte bei der Entwicklung eine besondere Herausforderung und im Hinblick auf einen Vermarktungserfolg eine entscheidendes Kriterium dar.

### **Fazit der Anforderungsanalyse:**

Die Anforderungsanalyse resultierte in einer konkreten Hard- und Softwarespezifikation des Intelligenten Leitkegels und der Komponenten für dessen einfaches Handling im Feld. Die wichtigsten Eckdaten und eine kurze Beschreibung sollen nachfolgend gegeben werden:

- Integration der benötigten Komponenten in die Fußplatte durch vergossene Elektronik:
- Realisierung mittels Mikrocontoller (MC) bzw. System On Chip (SOC)-Modul,
- Positionsbestimmung mittels LowCost GNSS-Modul,
- Mobilfunkbasierte Kommunikation (GPRS/UMTS), zukünftig 802.11p,
- Energieversorgung durch Akku in der Fußplatte,
- kontaktlose Aufladung über Ladespulensystem,
- funkbasierte Konfiguration per Bluetooth,
- Integration von Sensoren für die Lageerkennung, u.a.

Der Intelligente Leitkegel ist die Schlüsselkomponente und der eigentliche Datenlieferant der Kooperativen Schutz Einrichtung. Mit ihm werden Positionsdaten und weitere Informationen der Störstelle erfasst und an den Leitkegel-Server übertragen, wo sie dann ausgewertet und verteilt werden. Das Blockdiagramm des IL ist in Abbildung 29 dargestellt.

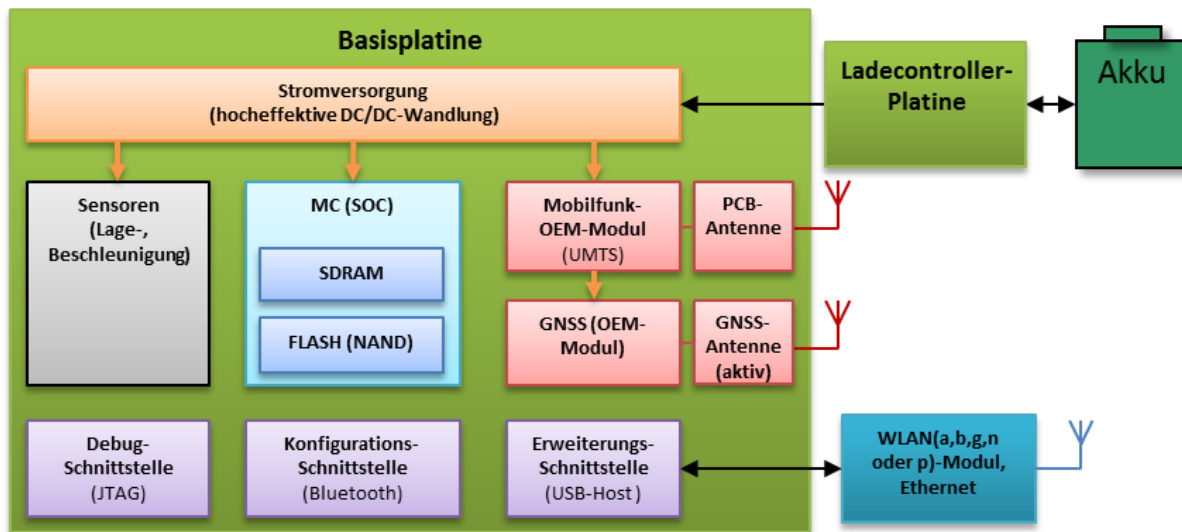


Abbildung 29: Blockdiagramm der IL-internen Komponenten.

Das Herzstück des IL stellt ein Rechnersystem basierend auf einem Mikrocontroller dar, auf dem ein Embedded Linux als Betriebssystem ausgeführt wird. Die Wahl eines Embedded-Linux als Betriebssystem begründete sich hierbei vornehmlich auf die Anforderungsanalyse und die Systemspezifikation und kann mit folgenden Aspekten begründet werden:

- sehr positive Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten,
- hervorragende Treiberunterstützung (GNSS, UMTS, Bluetooth),
- TCP/IP, VPN, PPPD, etc. für sicher Kommunikation vorhanden,
- einfache Anbindung von zusätzlicher Hardware möglich (WLAN(p), Ethernet),
- umfangreiche Toolchain für Entwicklung & Debug
- sehr gute Dokumentation und Support,
- Portierung für die verwendet RTKLIB möglich,
- freie Parser für die in der KSE spezifizierten und verwendeten Datenformate (JSON, XML,...) sind bereits vorhanden
- Open-Source, Quelloffen, frei verfügbar

Verschiedene interne Sensoren erlauben es, Bewegungen und Lage des IL zu erfassen. Mit diesen Sensoren können Trigger-Signale erzeugt werden, die das Aufstellen (Aktivieren) bzw. das Einsammeln (Deaktivieren) der IL automatisch erkennen. Die Eigenüberwachung des Leitkegels erkennt über die interne Sensorik das Überfahren, Versetzen oder auch Entfernen vom Unfallort und kann ggf. Warnmeldungen an die Einsatzkräfte absetzen, was die Sicherheit beim Einsatz weiter erhöht. Für die Kommunikation mit dem zentralen Server verfügt der IL über ein Mobilfunkmodem, mit dem ein bidirektionaler Datenaustausch nach dem UMTS-Standard erfolgt. Über diese Schnittstelle kann auch zentralseitig der Status des IL abgefragt werden oder ein Firmware-Update vorgenommen werden (OverTheAir). Die Energie für den kurzzeitigen Einsatz des IL wird von einem Lithium-Ionen-Akkumulator bereitgestellt, der nach jedem Einsatz kontaktlos geladen wird. Die kontaktlose Ladung über ein Spulensystem birgt für diesen Anwendungsfall viele Vorteile. Keine verdreckten Kontakte, die Einhaltung geforderter Schutzgrade und nicht zuletzt das einfache Handling, sollen hier als wichtigste Vorteile genannt werden. Als Konfigurations- und



Serviceschnittstelle im Feld, verfügt der IL über ein Bluetooth-Modul, über das sehr einfach mittels Handheld, Tablet oder Smartphone zugegriffen werden kann. Für Test-/Debug- und Entwicklungszwecke steht weiterhin eine Erweiterungsschnittstelle zu Verfügung, an die verschiedene Module, wie z.B. WLAN- oder Ethernet-Module angeschlossen werden können. Randbedingungen wie geringer Energieverbrauch, Schock- und Temperaturfestigkeit und nicht zuletzt Kosteneffizienz für das Gesamtsystem stellten weitere Herausforderung bei der Entwicklung des IL dar (siehe auch Anforderungsanalyse).

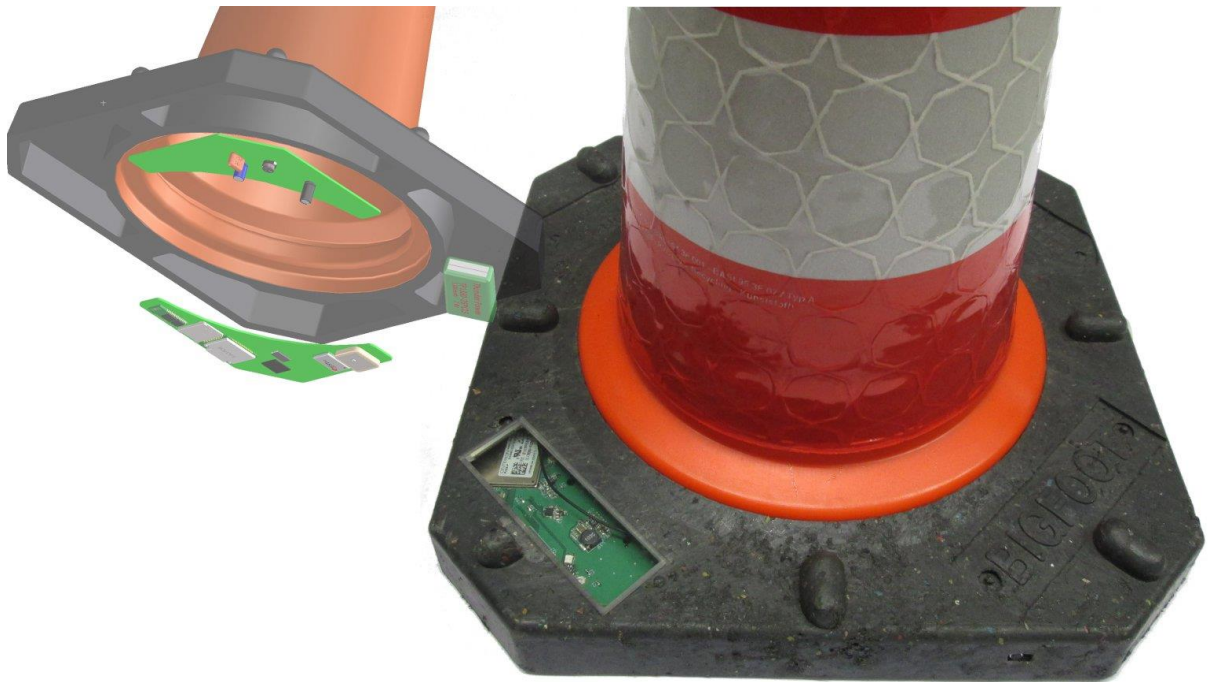


Abbildung 30: Prototyp des Intelligenten Leitkegels mit integrierter Elektronik

In Abbildung 30 ist der Intelligente Verkehrsleitkegel mit aufgehendem, konisch geformtem Körper und der Fußplatte für die Aufnahme der elektronischen und mechanischen Komponenten dargestellt. Die Fußplatte wird hierzu vorteilhaft ausgespart, um die Komponenten bzw. Module für die drahtlose Kommunikation, für die Energieversorgung, für die Ortung sowie für zusätzliche Sensoren aufzunehmen. Die Komponenten bzw. Module werden elektrisch und datentechnisch miteinander verbunden. Um die erforderliche Beständigkeit gegenüber Wetter- und Umwelteinflüssen im Verkehrsraum zu gewährleisten, werden die Aussparungen im Leitkegelfuß nach der Installation der Komponenten bzw. Module wasser- und staubdicht verschlossen. Der Verschluss erfolgt hierbei durch Vergießen aller Komponenten mit elektronischer Vergussmasse.

Über den Leitkegel können in weiteren Ausbaustufen neben der hochgenauen Positions- und Lageerfassung weitere Umfeldsensoren angeschlossen bzw. andere Leitkegel vernetzt werden. Auf diese Weise ist bspw. die Erfassung von längeren Baustellenbereichen möglich (Abbildung 39). Mit dem integrierten Temperatursensor ist es z.B. auch möglich, die Vereisungsgefahr von Fahrbahn zu erkennen.

### Prototypen des Intelligenten Leitkegels mit kontaktloser Ladestation

Für Test-, Versuchs- und Demonstrationszwecke wurde der IL in zweifacher Ausführung als prototypische Hardware nebst dazugehörigem Konfigurations- und Ladestation gefertigt. Mit den beiden vorhandenen Prototypen konnten die gebräuchlichsten Störstellenszenarien und Anwendungsfälle der Kooperativen Schutzeinrichtung getestet werden, für die mindestens zwei Intelligente Leitkegel benötigt werden. Solche Anwendungsfälle sind z. B. die Sperrung mehrerer Spuren oder die längenmäßige Vermessung einer Störstelle (siehe auch Abbildung 39).

Die Fertigung und Bearbeitung sowohl der mechanischen Komponenten (z.B. der Fußplatte), als auch der elektronischen Baugruppen, wurde vollständig am ifak, in den dafür vorhandenen Laboren und Werkstätten vorgenommen.



Abbildung 31: erstellte CAD-Zeichnung des verwendeten Leitkegels als Grundlage für die Planung der Komponentenintegration und für die Durchführung und Unterstützung der mechanischen Fertigung

Ausgehend von einer mechanischen CAD-Zeichnung (siehe auch Abbildung 31) wurden mittels einer Fräse die Fußplatten handelsüblicher Leitkegel so bearbeitet, dass der für die Integration der elektronischen Komponenten benötigte Bauraum freigestellt wurde. Bei dem manuellen Fräsvorgang war besonders die Form und die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials, welches aus verpresstem und vulkanisiertem Recycling-Material

bestand, besonders herausfordernd und bedurfte unter anderem auch der Fertigung einiger spezieller Werkzeuge und Spannvorrichtungen, wie in Abbildung 32 zu sehen ist.

Für die beiden im Vorhaben gefertigten Prototypen des Intelligenten Leitkegels wurden zusätzlich Abdeckungen aus PVC gefertigt, mit denen die elektronischen Komponenten staub- und wasserdicht verschlossen werden konnten. Gleichzeitig war es so in der Test- und Evaluierungsphase immer noch möglich, auf die Elektronikkomponenten zuzugreifen und ggf. Anpassungen vorzunehmen. In der endgültigen Ausbaustufen des IL wird dann die Elektronik vollständig mit einer speziellen Vergussmasse vergossen, um so auch den spezifizierten Anforderungen nach Schutzgrad, Schock- und Temperaturfestigkeit, Unauffälligkeit und Robustheit gerecht zu werden.

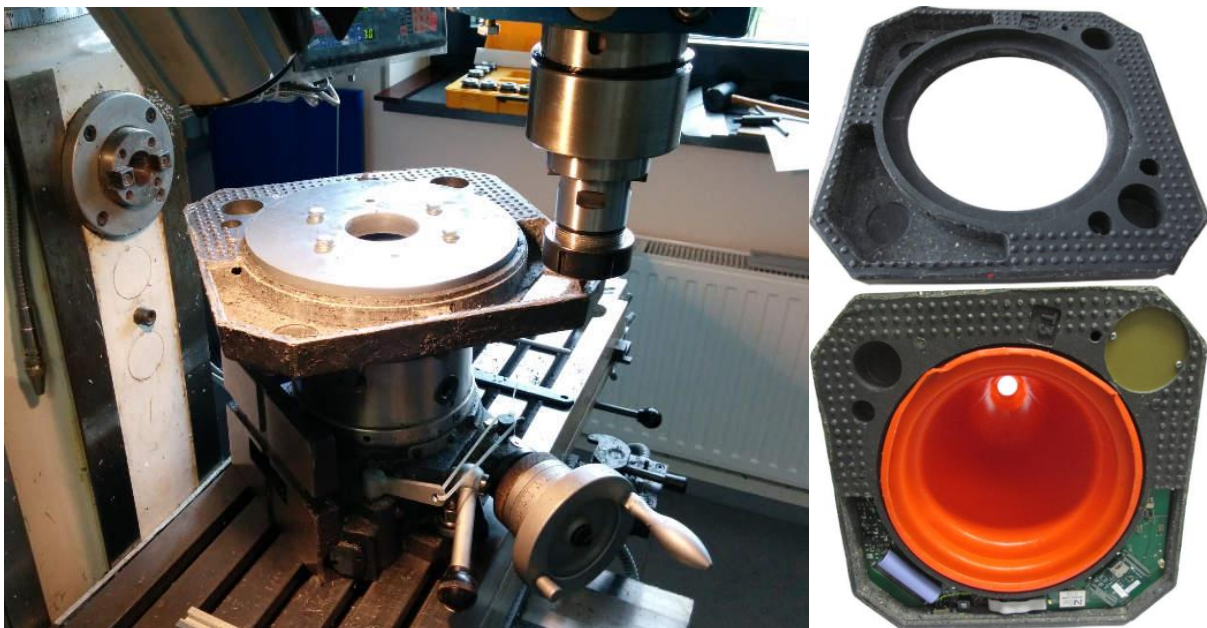


Abbildung 32: mechanische Fertigung der IL-Prototypen in der Werkstatt des ifak (links - Fräsen der Fußplatte in spezieller Spannvorrichtung, rechts – IL Prototyp, gefräste Fußplatte und IL mit integrierter Elektronik)

#### Kontaktlos-Ladestation des Intelligenten Leitkegels

In Abbildung 33 ist die Ladestation des Intelligenten Leitkegels als kompakte und robuste Ladeplatte dargestellt, wie sie im Forschungsvorhaben prototypisch umgesetzt wurde. In dieser nur 10 mm starken PVC-Platte konnte die entwickelte primäre Ladeelektronik (siehe auch Abbildung 35) mit einer Indikator LED, mit welcher der aktuelle Ladezustand angezeigt wird, vollständig integriert werden.

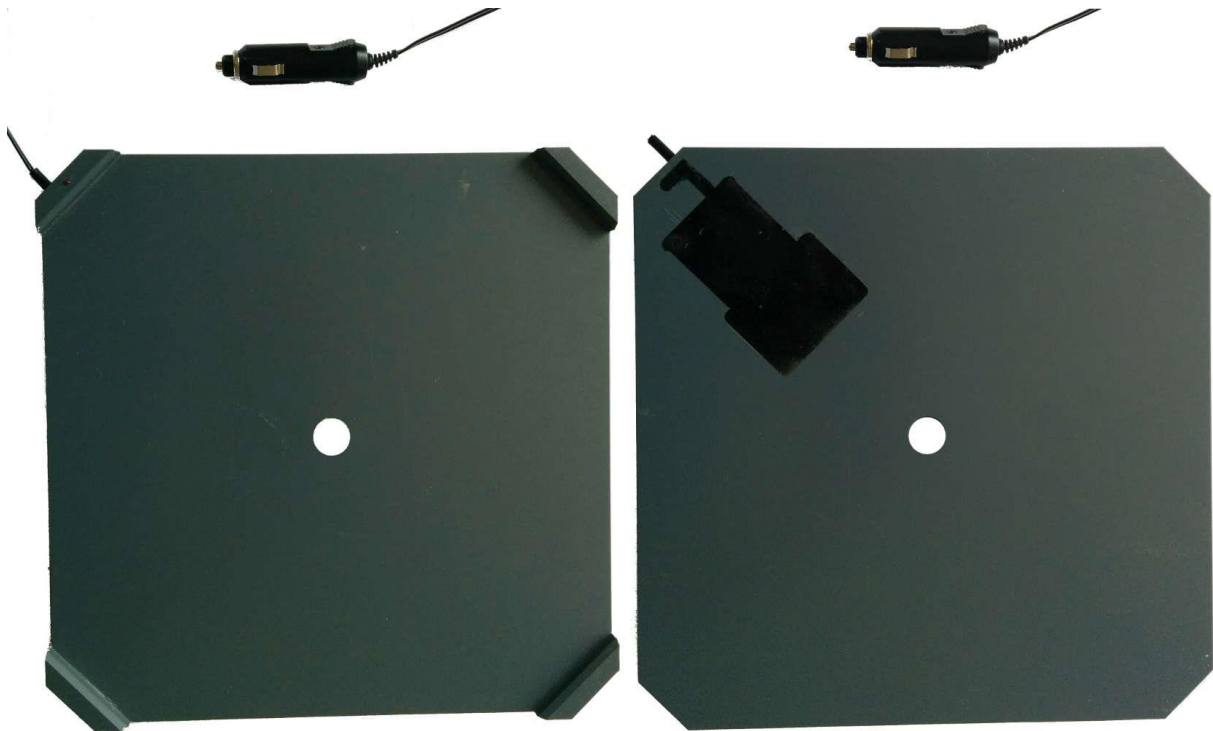


Abbildung 33: kontaktlose Ladestation des IL in Ober- und Untersicht mit vergossener Primärelektronik und Kfz-Bordnetzstecker für die Integration in die Einsatzfahrzeuge

Die primäre Ladeelektronik wurde so dimensioniert und designet, dass sie mit den in den Fahrzeugen zur Verfügung stehenden Bordspannung von 12V, eine optimale Energieübertragung gewährleistet. Die entwickelte Ladeelektronik ist an den Qi-Standard des WPC (Wireless Power Consortiums) angelehnt. Dieser Standard verwendet eine resonante induktive Kopplung zwischen Sender und Empfänger. Darüber hinaus tauschen Sender und Empfänger Daten aus, um eine angepasste und optimale Energieübertragung, sowie Schutz und Überwachungsfunktionen zu gewährleisten.

Das Schema der kontaktlosen Energieübertragung ist in Abbildung 34 dargestellt.

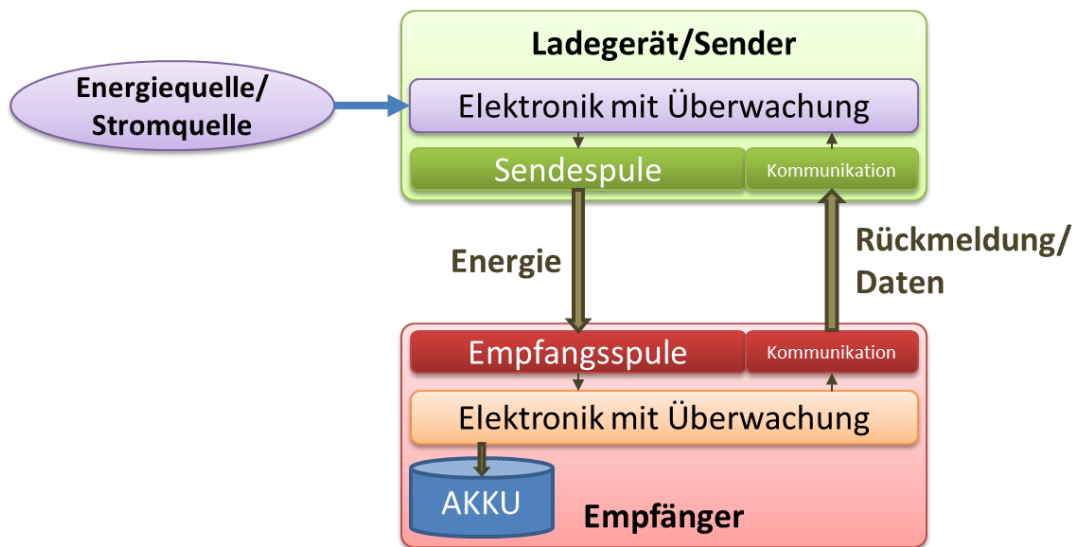


Abbildung 34: schematische Darstellen des für den IL verwendeten Qi-Standards

Durch die Verwendung des Qi-Standards war es im Forschungsvorhaben möglich, während des Designs und in der prototypischen Fertigung auf fertige Komponenten, wie z.B. die Sende- und Empfängerspulen, zurückzugreifen, um somit den Entwicklungsaufwand möglichst gering zu halten. Die Verwendung von Standardisierten Bauelementen aus dem Massenmarkt ist auch vor dem Hintergrund einer angestrebten Serienfertigung mit entsprechendem Preisdruck von großem Vorteil und hilft dabei, eine der wichtigsten, spezifizierten Anforderungen – geringer Stückpreis für den IL – einzuhalten.

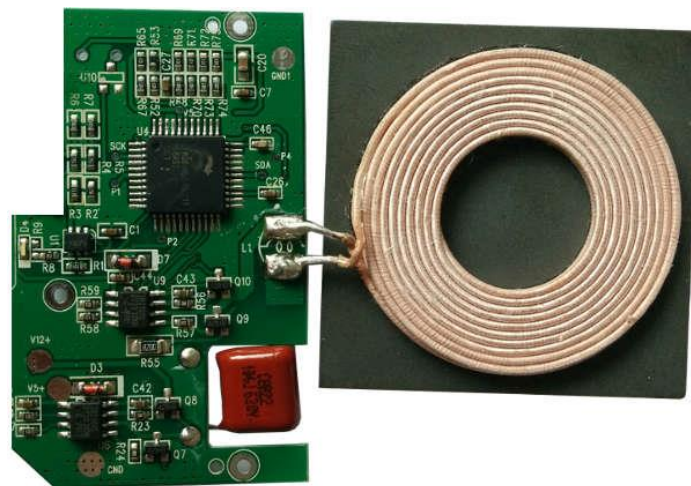


Abbildung 35: primäre Ladeelektronik der kontaktlosen Ladestation mit Sendespule und Ferit-Material

Die primärseitige Elektronik der Ladestation (Abbildung 35) wurde mit einer speziellen Vergussmasse in der PVC-Platte vergossen, was einen optimalen Schutz und die benötigte Robustheit gewährleistet. Darüber hinaus wurde die Ladestation mit einem Stecker für Kfz-Bordnetze ausgerüstet, um eine nachträgliche und einfache Integration in entsprechende Einsatzfahrzeuge zu ermöglichen.

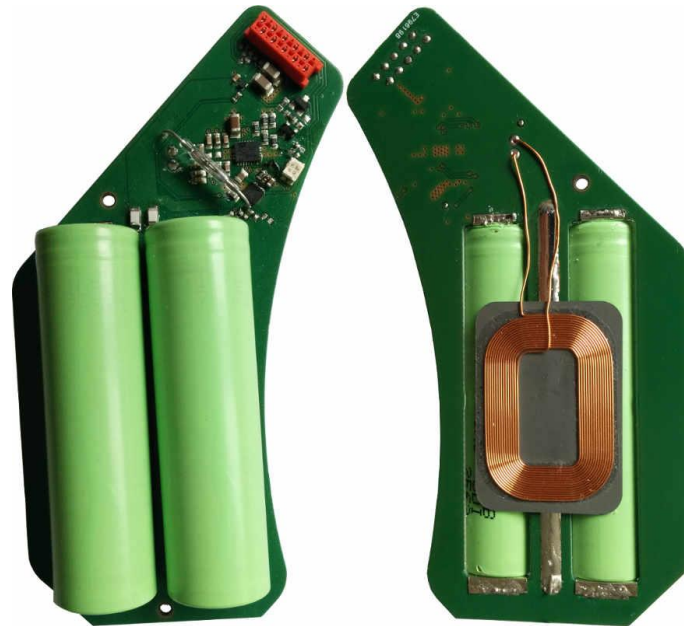


Abbildung 36: sekundärseitige (empfangsseitige) Ladeplatine des Intelligenten Leitkegels in Vorder- und Rückansicht mit Akku und Empfängerspule und weiteren elektronischen Bauteilen für die kontaktlose Energieübertragung

Für die Tests wurden die beiden verfügbaren Prototypen mit EPLUS-Datenkarte des ifak ausgerüstet. Dieser Aspekt ist dahingehen von Wichtigkeit, da die UMTS-Kommunikation zwischen Intelligentem Leitkegel und Leitkegelservers bedeutenden Einfluss auf Funktion der Kooperativen Schutzeinrichtung hat. Kriterien wie Netz-abdeckung, Netzverfügbarkeit, Datenraten und Timeoutzeiten sind hierbei entscheidend und oftmals von Netzbetreiber zu Netzbetreiber unterschiedlich. Alle in UR:BAN durchgeführten Tests und erzielten Ergebnisse mit der Kooperativen Schutzeinrichtung wurden ausschließlich mit dem Netzbetreiber EPLUS durchgeführt. Der Test unterschiedlicher Netzbetreiber wurde aus Zeit- und Ressourcengründen nicht durchgeführt.

Die IL-Prototypen wurden für die Verwendung von SIM-Karten (Subscriber Identity Module) im Formfaktor micro-SIM entwickelt. In naher Zukunft kann hier die Verwendung der eSIM (embedded SIM) forciert werden, welche als elektronisches Bauteil fest auf der Basisplatine des Intelligenten Leitkegels verlötet wird und somit einen steckbaren Kartenslot überflüssig macht. Entsprechende Bemühungen diesen eSIM-Standard voranzutreiben werden von namhaften Firmen wie Apple und Samsung unterstützt und tragen bereits erste Früchte. So hat beispielsweise der Anbieter Vodafone kürzlich eine Smart Watch herausgebracht, die den eSIM-Standard nutzt. Dieses besonders für M2M (Machine to Machine) vorteilhafte Konstrukt ist ideal für den intelligenten Leitkegel, da nur so die angestrebte vollständige Kapselung erreicht werden kann, um den spezifizierten Schutzgrad und die Schockresistenz zu erreichen.

### 3.4 Der Leitkegel-Server

Der Leitkegel-Server in Kombination mit der KSE-Applikation bildet die Kernkomponente der Kooperativen Schutzeinrichtung SK-35. Die zentrale Rolle des Leitkegel-Servers und der beteiligten Applikationen wird besonders im Kommunikationsschema der KSE in Abbildung 37 ersichtlich. Der Leitkegel-Server ist hierbei als funktionale Einheit bestehend aus einer entsprechend performanten Rechner-Hardware, den verschiedenen Applikationen der Middleware und den eigentlichen im Vorhaben entwickelten KSE-Applikation sowie einiger Hilfsapplikationen zu verstehen. Eine Übersicht über den Leitkegel-Server ist in Abbildung 37 ersichtlich.

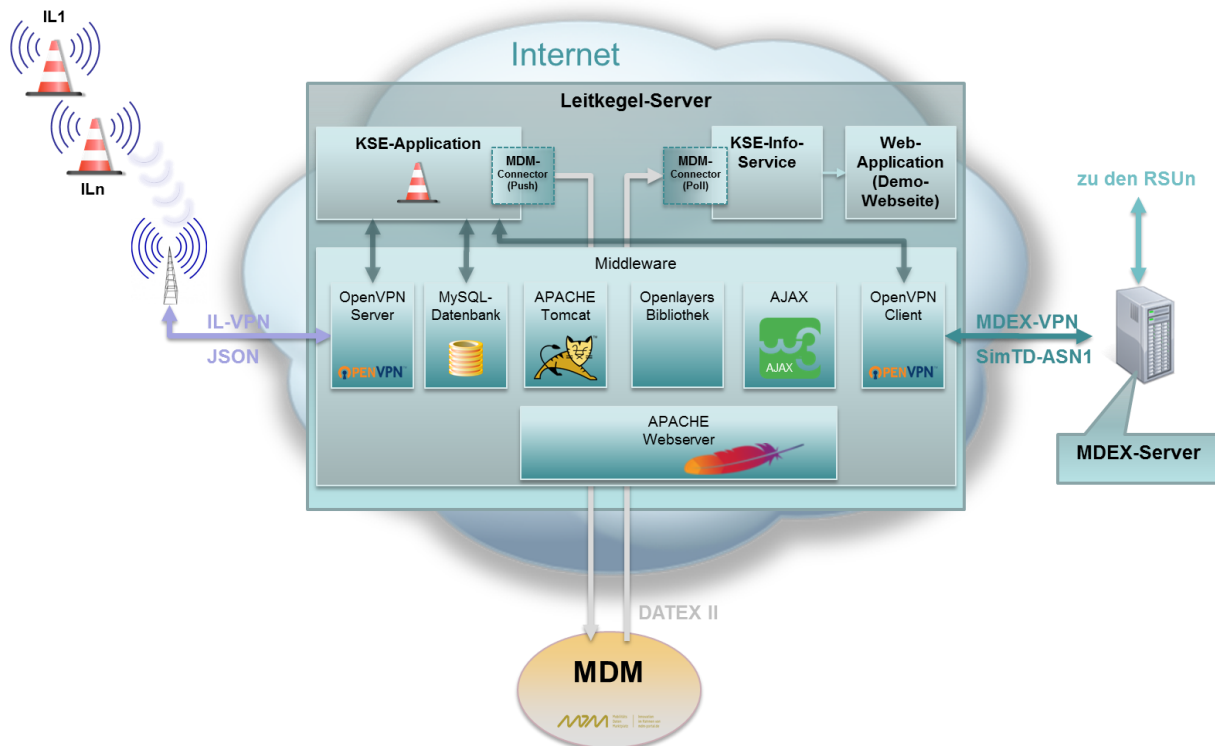


Abbildung 37: Komponenten und Applikationen des Leitkegel-Servers

Die wichtigsten Aufgaben, die durch den Leitkegel-Server abgedeckt werden, sind:

- Bereitstellung eines VPN für die Intelligenen Leitkegel (als VPN-Server)
- Verwaltung der Intelligenen Leitkegel in einer MySQL-Datenbank,
- Verwaltet die RSUn und somit die Smarten Kreuzungen in einer MySQL-Datenbank
- Ermöglicht Remotezugriff, Wartung und Statusabfrage der Intelligenen Leitkegel,
- Generiert Störstellenevents aus den Rohdaten der einzelnen Intelligenen Leitkegel (auch durch Kombination mehrerer Intelligenen Leitkegel im Verbund, siehe auch Abbildung 39),
- Stell die VPN-Verbindung zum AIM-Netzwerk in den jeweiligen Prüf- und Testfeldern her (als VPN-Client)
- Selektiert und Initiert den Remotezugriff auf diejenige RSU, die für die Störstellenevent zuständig ist (SK-Matching),
- Managet den Datenaustausch mit der RSU (Download der Kreuzungstopologie und Upload der Störstellennachricht, KSE-DENM)

- Empfängt DGNSS-Korrekturdaten von der RSU und verteilt diese an die Intelligenten Leitkegel (für den Anwendungsfall RSU als DGNSS-Basisstation, siehe auch Abschnitt 3.8)
- Postet die Störstelleninformation an den MDM über eine https-Verbindung im DATEX II Format
- Empfängt und verteilt KSE-Informationen aus dem MDM
- Bereitstellung einer KSE-Demo-Webseite für Demonstrations- und Testzwecke

Im Forschungsvorhaben URBAN wurde der Leitkegel-Server durch das ifak gehostet und gewartet. Im produktiven Einsatz ist Prinzipiell jeder Webhoster geeignet, der eine entsprechende Rechnerinfrastruktur mit Onlineanbindung bereitstellen kann.

Auch die Installation und Wartung der für die KSE benötigten Middleware könnte und sollte dann vom entsprechenden Webhoster eingekauft werden.

Nachfolgend sollen die im Vorhaben entwickelten Applikationen des KSE-Servers eingehender vorgestellt werden.

### **Entwicklung der KSE-Applikation**

Die KSE-Applikation ist die eigentliche Managementsoftware und das Herzstück der Kooperativen Schutzeinrichtung.

Der KSE-Applikation ist als Java Enterprise Edition (Java EE) -Applikation implementiert und läuft auf einem Apache-Tomcat Applicationserver. Die Kommunikation zwischen den Intelligenten Leitkegeln und dem KSE-Applikation wird durch ein spezielles Java-Servlet übernommen. Hierzu war es in einem ersten Schritt nötig, das Datenformat der KSE-Daten zu spezifizieren. Als Datenaustauschformat zwischen IL und KSE-Applikation kam das JavaScript Object Notation (JSON)-Format zum Einsatz. Die Spezifikation umfasste sowohl die von den IL gesendeten Störstellen-Ereignisdaten, als auch die IL-Statusdaten, mit denen der aktuelle Zustand der IL fortlaufend überwacht und protokolliert werden kann. Die Spezifikation der Störstellen-Ereignisdaten basiert zweckmäßigerweise auf der im AP2000 mit den Projektpartnern verabredeten Spezifikation der KSE-DENM (siehe hierzu auch Abschnitt 3.6 und [18]). Die entsprechende Daten-Spezifikation und der logische Aufbau der Störstellen-Ereignisdaten eines IL, sind im nachfolgenden Code-Auszug ersichtlich.



```
{
  "ITC_TrafficEvent":
  {
    "ITC_ID": 3,
    "UnixTimestamp": 1458300495,
    "TrafficEvent":
    {
      "ID": 2,
      "ActivationFlag": true,
      "ReactivationFlag": false,
      "Operator": 3,
      "ValidityPeriod": 60,
      "Event":
      {
        "TrafficFlowEffect":
        {
          "EffectCode": 7,
          "Tendency": null,
          "LengthAffected": null,
          "AverageSpeedAbsolute": null
        },
        "CauseCode": 2,
        "DirectCause":
        {
          "Severity": 4,
          "SubCaus": 2,
          "LengthEffectuated": null,
          "LaneRestriction": 1,
          "NumberOfLanes": 2
        },
        "Position":
        {
          "Longitude": 52.14259,
          "Latitude": 11.651638,
          "Altitude": 91.254,
          "Reliability": 100,
          "SbasFlag": true,
          "SaposFlag": false,
          "EgnosFlag": false
        }
      }
    }
  }
}
```

Neben den Parametern, die das Störstellen-Ereignis allgemein beschreiben, wie z.B. der Zeitstempel <"UnixTimestamp">, Gültigkeitsdauer <"ValidityPeriod"> oder Identifikation des IL <ITC\_ID">, seien hier besonders die Parameter zur Beschreibung des eigentlichen Störung erwähnt. Diese werden hauptsächlich aus der Störstellen-Konfiguration gebildet, die der Nutzer mittels einer Konfigurations-Applikation (siehe auch Abschnitt 3.7) vorgibt.

Bei den das Störstellen-Ereignis beschreibenden Positionsdaten <"Position"> sind neben der eigentlichen WGS84-Koordinate besonders die verschiedenen Parameter mit denen die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Positionslösung beschrieben werden können von Interesse. So kann beispielsweise angegeben werden, ob für die Berechnung der Position SBAS-Daten oder Korrekturdaten entsprechender Referenzstationsnetzwerke verwendet wurden (siehe hierzu auch Abschnitt 3.8).

Die einzelnen Intelligenten Leitkegel und deren (Status)Daten werden von der KSE-Applikation in einer MySQL-Datenbank organisiert.

Um den flexiblen Einsatz der KSE an allen im Vorhaben getesteten Smarten Kreuzungen zu gewährleisten, wurden die im AIM-Prüffeld in Braunschweig und im Testfeld Düsseldorf zur Verfügung stehenden RSUs ebenfalls in einer MySQL-Datenbanktabelle eingepflegt. Kommunikationsparameter, wie die IP-Adresse der entsprechenden RSU oder die Referenzposition des Knotenpunktes, zu dem diese RSU gehört, sind nur einige wichtige Daten, die für jede RSU in der Datenbank gespeichert werden. Mit diesen Informationen ist es möglich, bei Aktivierung der KSE, automatisch genau diejenige RSU und somit SK zu selektieren, die für den oder die IL gerade zuständig ist. Dies wird erreicht, indem die gespeicherte Referenzposition der Smarten Kreuzung mit der Position(en) des bzw. der angemeldeten Intelligenten Leitkegel in Bezug gesetzt wird (SK-Matching). Das SK-Matching wird erreicht, indem aus der Datenbanktabelle diejenige RSU/SK herausgesucht wird, die der gemeldeten IL-Position am nächsten ist. Darüber hinaus wird eine maximale erlaubte Entfernung, die aus der TOPO der entspr. Smarten Kreuzung berechnet wird (siehe auch Abbildung 38), in Form einer maximalen Entfernungsellipse berücksichtigt. Auch die Parameter der Entfernungsellipse werden für jede RSU/SK in der Datenbank gespeichert und immer dann angepasst, wenn sich an der TOPO-Datei etwas geändert hat. Somit soll sichergestellt werden, dass für den Farstreifen-Matching-Algorithmus, Daten auf Grundlage der SK-TOPO zur Verfügung stehen.

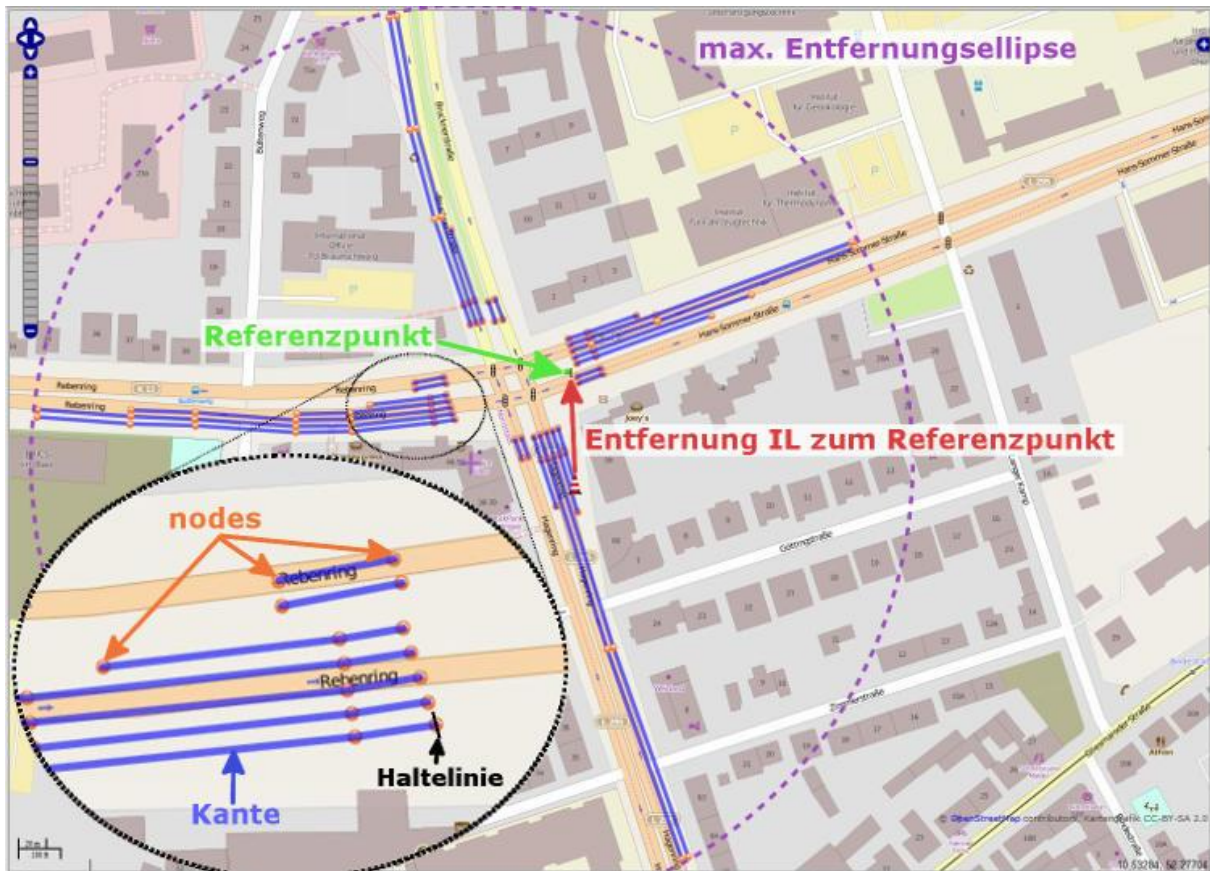


Abbildung 38: Kreuzungstopologie an der K047 im Prüffeld Braunschweig als Datengrundlage für das SK- und Fahrstreifen-Matching der KSE

Für das SK-Matching und das fahrstreifengenaue Matching der IL werden präzise Geo-Daten benötigt. Diese können mit hochgenauen, digitalen Karten erzeugt werden. An der Smarten Kreuzung werden diese Daten jedoch aus der Kreuzungstopologie gewonnen, in welcher das genaue Layout der entsprechenden Kreuzung in einer XML-formatierten Datei hinterlegt ist. Diese Datei bildet auch die Grundlage für die Intersection-Nachricht, welche an die Fahrzeuge gesendet wird, und muss für jede Smarte Kreuzung in den jeweiligen Prüf- und Testfeldern zur Verfügung stehen. Die KSE-Applikation lädt nach erfolgreichem Verbindungsaufbau diese TOPO-XML-Datei von der entsprechenden RSU herunter, dekodiert diese und verwendet dann die Daten für die Matching-Algorithmen. Für den sicheren Download der XML-Datei wurde das scp-Protokoll verwendet (scp – Secure Copy).

Die Kreuzungstopologie, wie sie in der entsprechenden TOPO-Datei der Smarten Kreuzung beschrieben wird, liegt in Form von kartesischen Koordinaten vor. Hierbei wird jeder Knotenpunkt „node“ als relative X,Y-Koordinate bezogen auf den hochgenau eingemessenen Referenzpunkt der Kreuzung angegeben [19]. Sowohl der SK-Matching als auch der Fahrstreifen-Matching-Algorithmus der KSE-Applikation nutzen sinnvollerweise das Koordinatensystem, dass durch die Kreuzungstopologie vorgegeben wird. Da die von den

Intelligenten Leitkegeln berechneten und versendeten Koordinaten auf ein geodätisches Koordinatensystem bezogen sind (WGS84), musste in einem ersten Schritt eine Koordinatentransformation durchgeführt werden. Für diese Transformation wurde Web-Mercator verwendet [20]. Web-Mercator ist eine leichte Variation der Mercator Projektion und der de facto Standard für Web-Mapping-Applikationen. Hierbei wird in sehr guter Näherung angenommen, dass die Erdoberfläche, bei den relativ kleinen Abständen, wie im Umkreis der SK, eben ist.

Somit können die relativen IL-Koordinaten, bezogen auf die Referenzposition der SK, mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$y = Ost = a(\lambda - \lambda_0) \quad (1)$$

$$x = Nord = a \ln \left[ \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \left( \frac{1 - e \sin \phi}{1 + e \sin \phi} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \quad (2)$$

$$h = k = \frac{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}{\cos \phi} \quad (3)$$

Wobei:

- $\lambda$  Ellipsoid Longitude in Radiant (geographische Länge)
- $\phi$  Ellipsoid Latitude in Radiant (geographische Breite)
- $a$ =kleine Halbachse des Erdellipsoiden [WGS84=6378137] in Metern
- $e$ =Exzentrizität des Erdellipsoiden [WGS84=0,081819191]
- $h$ =Skalierungsfaktor (meridian, Nord-Süd-Richtung)
- $k$ = Skalierungsfaktor (parallel, Ost-West-Richtung)

Die Skalierungsfaktoren „h“ für die Nord-Süd-Richtung und „k“ für die Ost-West-Richtung sind gleich, da bei der Merkator Projektion der Skalierungsfaktor an einem bestimmten Punkt in allen Richtungen gleich groß ist.

Mit den oben genannten Gleichungen können dann die relativen Koordinaten des IL in Bezug zum Referenzpunkt wie folgt berechnet werden:

$$il_x = \frac{(x_{referenzpunkt} - x_{il})}{h} \quad (4)$$

$$il_y = \frac{(y_{referenzpunkt} - y_{il})}{k} \quad (5)$$

Mit den kartesischen Koordinaten der IL ist es für das SK-Matching recht einfach möglich, zu prüfen, ob der entsprechenden IL innerhalb der maximalen Entfernungsellipse liegt. Mit folgender Ungleichung wurde dies im Vorhaben realisiert:

$$\frac{(il_x - cx)^2}{rx^2} + \frac{(il_y - cy)^2}{ry^2} \leq 1 \quad (6)$$

Hierbei sind  $(il_x, il_y)$  die Koordinate des Intelligenten Leitkegels,  $(rx, ry)$  die Radien der Entfernungsellipse auf den entsprechenden Achsen und  $(cx, cy)$  der Mittelpunkt der Entfernungsellipse bzw. der Offset zum Referenzpunkt der SK.

Wenn die in Ungleichung (6) für eine IL-Koordinate  $(il_x, il_y)$  erfüllt ist, befindet sich der Intelligente Leitkegel im betrachteten Umfeld der SK. Somit können dann alle weiteren Berechnungen mit dem Fahrstreifen-Matching-Algorithmus mit dieser selektierten SK durchgeführt werden.

Mit dem Fahrstreifen-Matching-Algorithmus wird nun diejenige Kante gesucht, die den geringsten Abstand zur IL-Koordinate aufweist. Eine Kante bezeichnet hierbei die vektorielle Repräsentation des Streckenabschnittes, der zwei benachbarte Stützstellen „nodes“ der Kreuzungs-TOPO miteinander verbindet. Ein Fahrstreifen kann je nach Komplexität, beliebig viele Stützstellen aufweisen. Die erste Stützstelle eines Fahrstreifens liegt immer auf der Haltelinie des Fahrstreifens und ermöglicht somit auch die Berechnung des Abstandes der Störung bis zur Haltelinie.

Dazu wird rekursiv für jede Kante der SK-TOPO eine vektorielle Geradengleichung aufgestellt, zu der dann der Abstand berechnet wird.

Über die Kante mit dem kleinsten Abstand zur IL-Koordinate kann dann schlussendlich auf den entsprechenden Fahrstreifen referenziert werden.

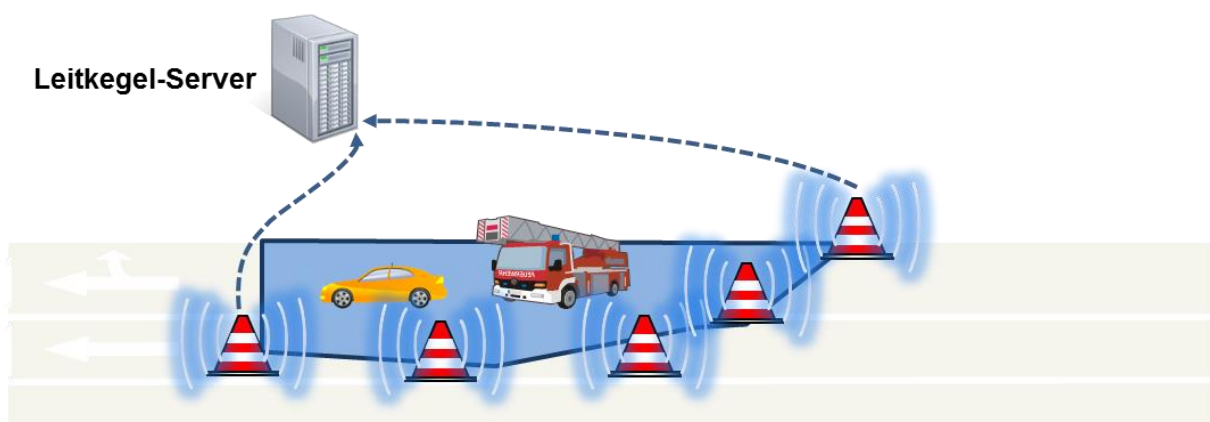


Abbildung 39: Leitkegel-Server generiert Störstelleninformation durch Kombination mehrerer Intelligenter Leitkegel

Ein weiteres wichtiges Feature der KSE-Applikation, welches im Vorhaben erfolgreich implementiert und getestet wurde, ist die kombinierte Störstellen-Ereignis-Generierung mit mehreren IL im Verbund (siehe auch Abbildung 39). Da jedes Störstellen-Ereignis mit einer eindeutigen ID beschrieben ist, kann die KSE-Applikation die Daten beliebig vieler IL, die die gleiche Störstelle beschreiben, sehr einfach zuordnen. So ist es dann mit den präzisen Positionsdaten mehrerer IL möglich, auch komplexe Störstellenabmessungen adäquat zu beschreiben. Hier seien beispielhaft die Ausdehnung über mehrere Fahrstreifen oder die Vermessung der Störstellenlänge bzw. der Abstand zur Haltelinie erwähnt. Über den Höhenunterschied verschiedener IL können weiterhin auch Rückschlüsse gezogen werden, ob der Störstellenbereich eventuell abschüssig oder ansteigend ist. Diese Daten stellen wichtige Eingangsdaten für andere Applikationen der Smarten Kreuzung dar.

Wenn nun die KSE-Applikation alle Parameter erhoben hat, die das Störstellen-Event beschreiben, muss in einem letzten Schritt der Verkehrsteilnehmer informiert werden.

Im Forschungsvorhaben wurden hier zwei Ansätze gewählt und erfolgreich implementiert.

Für die Verbreitung über den Mobilitäts Daten Marktplatz (siehe auch weiter unten) musste für die Realisierung durch die KSE-Applikation zuerst ein DATEX II-Datenmodell für die Bereitstellung von KSE-Informationen im MDM spezifiziert werden. Weiterhin war die Entwicklung eines MDM-Connectors erforderlich, der über Push-Mechanismen die Datenübertragung zum MDM realisierte.

Für die Verbreitung der KSE-Daten über DSRC-Funk 82.11p direkt an die Fahrzeuge musste die KSE-Applikation eine entsprechende KSE-DENM generieren und als Upload an die selektierte RSU senden (siehe hierzu auch Abschnitt 3.6).

Nachfolgend sind die wichtigsten Aufgaben der KSE-Applikation nochmals zusammengefasst:

- Verwaltet die IL und RSU in einer MySQL-Datenbank
- Entgegennahme von IL-Störstellen-Ereignis-Daten durch die Serverapplikation
- Entgegennahme von IL-Status-Daten durch die Serverapplikation
- Einlesen der Kreuzungstopologie von der selektierten RSU über das MDEX-VPN und Speichern in interner Datenstruktur
- Fahrstreifengenaues Matching der KSE-Position auf Grundlage der Kreuzungstopologie
- Verarbeitung mehrerer IL-Events zur automatisierten Bildung von Störstellendaten (siehe auch Abbildung 39)
- Automatische Berechnung der Entfernung bis zur Haltelinie, der Störstellenlänge (bei mehreren IL) sowie der Anzahl gesperrter Fahrspuren
- Erzeugen von DENM-Datenpaketen anhand der empfangenen IL-Störstellen-Events und Übertragung zur RSU/AU über das MDEX-VPN auf Basis der KSE-DENM-Spezifikation (siehe auch Abschnitt 3.6, [20] und [18])
- Fortlaufende Aktualisierung und Übertragung der DENM-Datenpakete anhand der momentan aktiven IL (neu aufgestellte IL und IL, die entfernt wurden und sich abgemeldet haben)
- Übertragung der KSE-Informationen an das MDM-Brokersystem in Echtzeit per Push-Verfahren über zertifikatsbasierte HTTPS-Verbindung (MDM-Connector Push)

### **Entwicklung einer KSE-Info-Service-Applikation**

Die KSE-Info-Service-Applikation ist für die Abfrage von KSE-Informationen aus dem MDM zuständig und stellt diese Informationen für andere Applikation zur Verfügung.

Der KSE-Info-Service ist somit eine Programmkomponente, welche Informationen über alle aktiven Intelligenten Leitkegel bereitstellt. Alleinige Datengrundlage hierbei sind die Daten der Intelligenten Leitkegel im Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM). Als Nutzer dieser Daten denkbar sind bspw. webbasierte Applikationen zur Darstellung von Verkehrsstörungen auf einer digitalen Karte, wie die weiter unten beschriebene Web-Applikation, oder Navigationsanwendungen, welche die aktuelle Verkehrslage berücksichtigen und somit in der Lage sind, Verkehrsteilnehmer um bspw. Unfallpunkte und gesperrte Straßen herumzuführen und Alternativrouten anzubieten.

Obwohl es theoretisch möglich ist, Clients zur Nutzung von Verkehrsdaten, bereit gestellt von Intelligenten Leitkegeln, direkt vom MDM zu beziehen, ist dies – gerade vor dem Hinblick des Einsatzes einer Vielzahl mobiler Applikation – nicht sinnvoll. Konkret bedeuten würde dies, die Einrichtung zertifikatsbasierter Verbindungen und die Einrichtung von Nutzer-Accounts für jedes mobile Endgerät, deren Aufwand in keinem Verhältnis zum erzielten Nutzen steht. Die Einrichtung des oben erwähnten KSE-Info-Service schafft in diesem Fall Abhilfe. Er stellt in der einen Richtung die notwendige zertifikatsbasierte und sichere Datenverbindung zum MDM her, auf der anderen Seite werden diese Informationen in einem entsprechend optimiertem Datenformat für Nutzer über eine einfache HTTP-Verbindung zur Verfügung gestellt.

Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Entkopplung von Aufrufen der Clientapplikationen und dem Datenzugriff auf den MDM. Der KSE-Info-Service wurde zu diesem Zweck als Proxy-Server mit eingebautem Cache-Mechanismus entwickelt, welcher Clientanfragen nicht direkt zum MDM weiterleitet sondern die Antworten aus einem eingebauten Zwischenspeicher (Cache) generiert. Dieser Zwischenspeicher stellt ein 1:1-Abbild der Daten sämtlicher im MDM vorhandener Intelligenter Leitkegel dar, wobei eine zeitgesteuerte Funktion für die Synchronisierung zwischen MDM und diesem Cache und somit für eine permanente Aktualität der Leitkegeldaten im KSE-Info-Service sorgt. Eine Erhöhung der Anfragenlast hat somit keine Auswirkungen auf die Anzahl der Zugriffe auf den MDM – hier ist lediglich dafür zu sorgen, dass der entsprechende Server in der Lage ist, die Last zu bewältigen. Gegebenenfalls ist dies durch die Bereitstellung zusätzlicher Server und bspw. den Einsatz von Mechanismen zum Load Balancing sicherzustellen.

### **Entwicklung einer Web-Applikation als Demo-Webseite für die Darstellung von KSE-Informationen auf einer digitalen Karte**

Für Visualisierungs-, Test- und Demonstrationszwecke wurde im Forschungsvorhaben eine Web-Applikation in Form einer Demo-Webseite für die Darstellung von KSE-Informationen entwickelt, mit deren Hilfe wichtige Funktionen der Kooperativen Schutzeinrichtung im Umfeld der Smarten Kreuzung in Echtzeit ausgewertet werden konnten. Die Webseite basiert auf der lizenzfreien OpenSource-Karte OpenStreetMap [21] und verwendet die

OpenSource JavaScript-Library OpenLayers zur Darstellung der dynamischen Inhalte. Ein wichtiges Feature ist die Visualisierung der aktuellen Kreuzungstopologie auf der Karte (siehe Abbildung 40). Auf diese Weise konnte während der Test sehr schnell Rückschlüsse gezogen werden, ob die Übertragung und Decodierung Kreuzungstopologie als Basis für den Fahrstreifen-Matching-Algorithmus fehlerfrei funktioniert hat. In diesem Zusammenhang wurde die Webseite auch als Testplattform für die Validierung der generierten DENM-Daten, insbesondere der Richtigkeit des Fahrstreifen -Matchings und der Anzahl gesperrter Fahrspuren herangezogen. Da die Anbindung der KSE an den MDM im Vorhaben eine große Bedeutung zukam, wurde für die Demo-Webseite weiterhin ein Asynchronous JavaScript and XML- (AJAX)-Client implementiert, der browserseitig für die zyklische Abfrage von KSE-Informationen aus dem MDM über den weiter oben vorgestellten MDM-Info-Service zuständig ist. Mit dieser Implementierung war es möglich, fortlaufende Aktualisierung der IL-Standorte und -Informationen auf der Karte anhand der zurückgelieferten Daten vom MDM, anzuzeigen und auszuwerten.

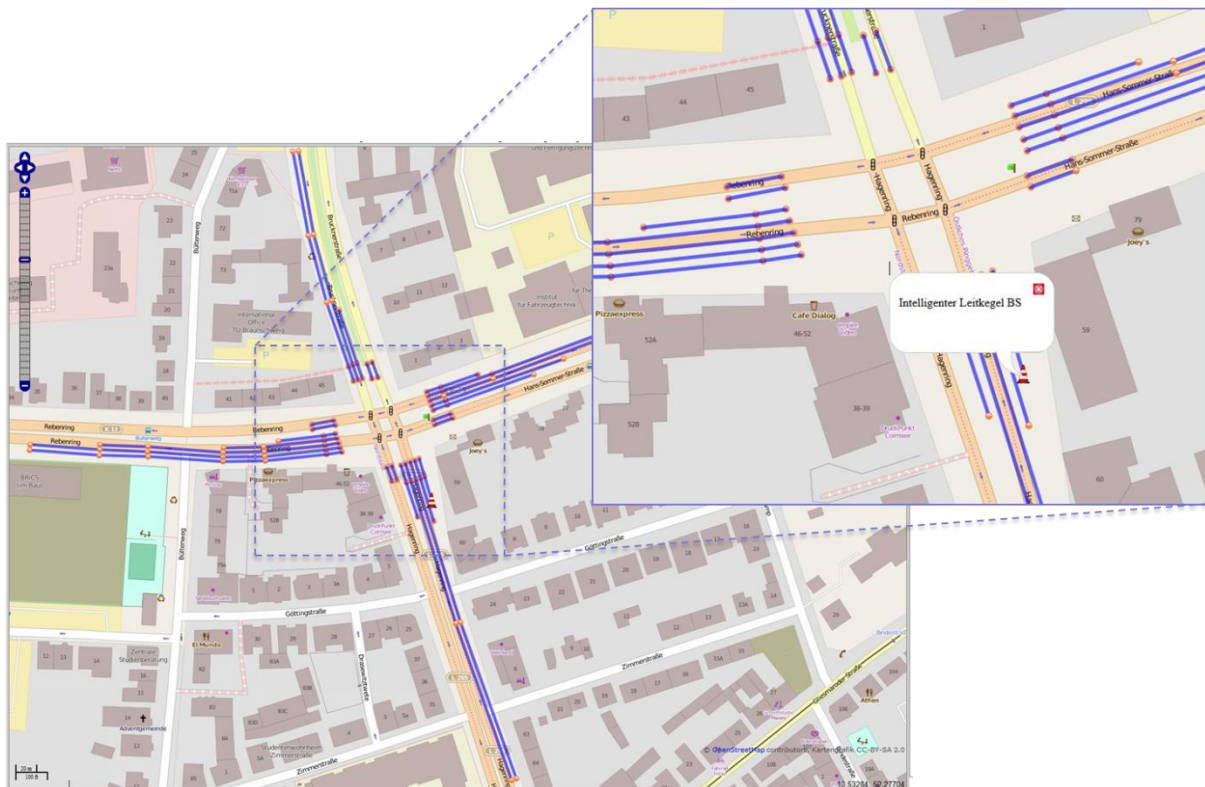


Abbildung 40: KSE-Demo-Webseite mit TOPO und IL an der K047 im Prüffeld Braunschweig als OSM-Layer

### MDM-Anbindung der KSE

Eine wichtige funktionale Erweiterung und Ergebnis im Vorhaben war die Anbindung der Kooperativen Schutzeinrichtung an den MDM.



Informationen, die mit der KSE und dem Intelligenten Leitkegel erfasst und versendet werden, gewinnen bedeutend an Mehrwert, wenn diese nicht nur an lokale Systeme, wie eine RSU an der „Smarten Kreuzung“ und damit an die in einem bestimmten Umkreis befindlichen Fahrzeuge gesendet werden, sondern wenn sie darüber hinaus auch über eine zentrale Plattform für eine Vielzahl weiterer Nutzer zur Verfügung gestellt werden können. Zu nennen wären hierbei besonders Applikationen aus den Teilprojekten Regionales Netz (RN) und Urbane Straße (US).

Hierfür bietet sich der Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM) als bundesweit zentrale Datenaustauschplattform für jegliche Art von Verkehrsdaten an.

Die Datenbereitstellung über den MDM setzt das Vorliegen der zu übertragenden Daten im DATEX II-Format voraus [22]. Das alternativ zur Verfügung stehende Containerformat für die Übertragung proprietärer Daten kam für die Bereitstellung von Daten des Intelligenten Leitkegels zugunsten des vom MDM empfohlenen DATEX II-Formates nicht zur Anwendung

Grundsätzlich stehen für die Übertragung von Daten in den MDM zwei Verfahren zur Auswahl – die Datenübertragung mittels Push bzw. Pull. Während im ersteren Fall der Datenanbieter für die zyklische oder ereignisbasierte Übertragung der Daten zu sorgen hat, ruft der MDM beim Pull-Verfahren selbständig die Daten von einem zu benennenden Server in einem konfigurierbarem Zeitintervall ab. Aufgrund der kleinstmöglichen zeitlichen Auflösung von einer Minute beim Pull-Verfahren auf der einen Seite, aber der Erfordernis einer möglichst verzögerungsfrei zu übertragenen Information auf der anderen Seite wurde für die Übertragung von Daten des Intelligenten Leitkegels das Push-Verfahren gewählt.

Daten des Intelligenten Leitkegels werden nicht auf direktem Weg vom Leitkegel zum MDM übertragen. Dies würde die Einrichtung eines MDM-Nutzerzugangs pro datenlieferndes Gerät (IL) erfordern und ist auch unter übertragungstechnischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll. Daten aller sendenden Intelligenten Leitkegel gelangen darum zunächst auf einen Server (siehe Leitkegel-Server), welcher in einem nachfolgenden Schritt diese in das notwendige DATEX II-Format konvertiert und an den MDM weiterleitet. Bei dieser Vorgehensweise ist nur die Einrichtung eines einzigen MDM-Nutzerzugangs notwendig. Realisiert wurde der entsprechende Server in Form eines Java-Servlets auf einem Apache Tomcat Applicationserver. Er beinhaltet sowohl die Funktionalität eines Kommunikationspartners für alle sendenden Intelligenten Leitkegel als auch die für Konvertierung und Weiterleitung dieser Informationen an den MDM. Abbildung 41 zeigt die entsprechende Architektur und den Datenfluss dabei.

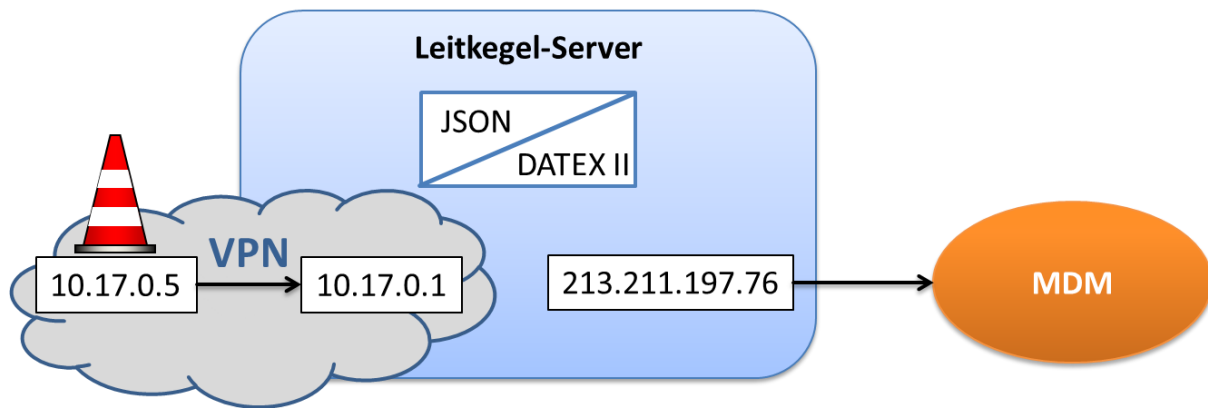


Abbildung 41: Datenbereitstellung Intelligenter Leitkegel im MDM

Alle sendenden Intelligenzen Leitkegel und der Leitkegel-Server sind hierbei innerhalb eines separaten VPN miteinander verbunden. Über eine zweite, öffentliche IP-Adresse ist der Leitkegel-Server mit der Außenwelt verbunden und sendet die in das DATEX II-Format konvertierten Daten an den MDM.

Ein Intelligenter Leitkegel sendet die im JSON-Format kodierten Daten einer Störung an den Leitkegel-Server über einen HTTP-Request und die POST-Methode an die IP-Adresse des Servers aus dem VPN. Die gesendeten Informationen aller Leitkegel werden in einer Liste im Speicher des Servlets permanent gespeichert. Nach jeder Datenübertragung eines Intelligenzen Leitkegels an den Leitkegel-Server wird diese Liste aktualisiert und die Datenübertragung in den MDM angestoßen. Da für alle Leitkegel nur eine einzige MDM-Publikation existiert und das Konzept des MDM keine inkrementelle Datenübertragung zulässt, ist es notwendig, die Daten aller aktiven Leitkegel zu übertragen, auch wenn sich nur der Status eines einzigen Intelligenzen Leitkegels geändert hat. Um aus der Liste im Speicher des Leitkegel-Servers ausgetragen zu werden, und somit auch im MDM nicht mehr aufzutauchen, muss ein Intelligenter Leitkegel explizit ein Datentelegramm mit einer Deaktivierungsanforderung an den Leitkegel-Server senden.

Die Informationen Intelligenzen Leitkegel können von jedem Interessenten vom MDM bezogen werden. Voraussetzung hierfür ist ein entsprechender Nutzerzugang und das Einrichten einer Subskription durch den Datenanbieter für jeden Datennehmer.

### 3.5 Road Side Unit (RSU) im Kontext der KSE

Die RSU ist für die Applikation SK35 unerlässlich und dient vornehmlich als Kommunikationsrelais für die Versendung von KSE-DENM-Nachrichten an die Verkehrsteilnehmer. Darüber hinaus stellt der Basisdienst RSU verschiedene Informationen wie z.B. die Kreuzungstopologie bereit, welche von der SK35-App für eine korrekte Funktion benötigt wird. Die RSU besteht im Wesentlichen aus einer Rechereinheit, der AU, und verschiedenen Modulen für die Kommunikation. Die für die Applikation wesentlichen und benötigten Kommunikationsmodule sind zum einen das G3-Modem für die Backendkommunikation per Mobilfunk und zum anderen die CCU für die C2X-Kommunikation.

Eine Besonderheit stellt die Verwendung der RSU als Basisstation für die GNSS-Verortung der Intelligenten Leitkegel nach dem Differential- GNSS-Verfahren bzw. RTK-Verfahren dar (siehe auch Abschnitt 3.8). Bei der Entwicklung der Applikation SK35 und auch während der Integrationstests, hat sich gezeigt, dass die Qualität der Verortung im Hinblick auf Genauigkeit und Geschwindigkeit gesteigert werden kann, wenn dieses Verfahren zum Einsatz kommt. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, die RSU mit einem zusätzlichen GNSS-Empfänger auszurüsten, der dann Korrekturdaten für die IL (Rover) zur Verfügung stellen kann. Als Schnittstelle kommt auch hier wieder die Backend-Kommunikation über die Mobilfunkverbindung zum Einsatz. Das Standard-Datenformat für den Austausch der Korrekturdaten ist RTCM3.

Für erste Forschungs- und Laborversuche aber auch für Tests im Telematik-Testfeld und dem Galileo-Testfeld Magdeburg, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine eigene RSU auf Basis eines PC104-Rechnersystems aufgebaut, mit der auch außerhalb der UR:BAN Prüf- und Testfelder in Braunschweig und Düsseldorf umfangreiche Tests sowohl mit der KSE (Applikation SK35) als auch mit der RSE (Applikation SK34) durchgeführt werden konnten. In dieser mobilen Test-AU sind wesentliche Komponenten und Funktionen enthalten, wie sie auch in der realen Applikation Unit an der Smarten Kreuzung anzutreffen sind. Auch das installierte Betriebssystem und das Dominion-Framework sind äquivalent zu den Installationen der Prüf- und Testfeld-AUs und erlaubten eine stringente Applikationsentwicklung auch ohne direkten Zugriff auf die Forschungskreuzungen in den Testfeldern.

Abbildung 42 zeigt das entwickelte PC104-System mit den entsprechenden Hardwarekomponenten.



Abbildung 42: ifak Test-RSU/AU mit verschiedenen Antennen

Für eine genauere Beschreibung der RSU siehe hier auf die SK-20: Basisdienst Road-Side-Units (RSU) des Projektpartners DLR verwiesen.

### **Backend-, Mobilfunkkommunikation mit der RSU**

Prinzipiell kann die Backendkommunikation kabelgebunden, z.B. mittels DSL, oder per Mobilfunk erfolgen. Eine Onlineanbindung der RSU ist zum Zwecke der Wartbarkeit über einen Remote-Zugriff in jedem Fall sinnvoll und für die Funktion der KSE unabdingbar, da über diese Schnittstelle der Datenaustausch mit dem Leikegel-Server erfolgt. Der Onlineanbindung per Mobilfunk sollte immer dann den Vorzug gegeben werden, wenn Verkabelungen aus Kosten- oder baulichen Gründen nicht in Frage kommen.

Im Prüf-Feld Braunschweig wurde das AIM-Netzwerk durch einen externen Provider, der mdex-GmbH, zur Verfügung gestellt und gewartet. Eine solche Variante wäre im Sinne der Übertragbarkeit auch in den anderen Testfeldern und für den produktiven Einsatz denkbar aber nicht zwingend erforderlich. Die Verwendung eines Virtual Privat Networks – (VPN) für die Backendkommunikation mit den RSU ist aus Sicherheitsgründen und zum Zwecke der besseren Wartbarkeit und Skalierbarkeit unbedingt zu empfehlen. Das Outsourcen der Backendkommunikation an einen externen Provider wie der mdex-GmbH, bieten im Hinblick auf Wartung und Sicherheit einige Vorteile, die bei der Übertragung und Implementierung berücksichtigt werden sollten. Das Einpflegen von sicherheitsrelevanten Updates, sowie die zentrale und autorisierte Erstellung und Vergabe von Zugängen über Zertifikate und Schlüssel bieten wesentliche Vorteile bei Sicherheitskritischen Anwendungen.

Bei der Auswahl des Mobilfunkbetreibers sollte weiterhin auf eine entsprechende Netzabdeckung geachtet werden. Dies ist in Ballungszentren, wie den UR:BAN-Test- und Prüf-Feldern nicht so relevant, da hier die meisten Mobilfunknetze ein gut bis sehr gute Abdeckung haben. Die verfügbare Mobilfunkgeneration sollte min. G3 sein und eine Kommunikation nach dem Standard UMTS ermöglichen. Bei den verfügbaren Mobilfunktarifen existieren auch reine Datentarife mit denen Datenfltrate bis in den GB-Bereich möglich sind. Hier sollte eine Sinnvolle Auswahl z.B. 1GB pro Monat getroffen werden.

### **3.6 Verbreitung der KSE-Informationen an die Verkehrsteilnehmer**

Die vielfältige Verbreitung der vom KSE generierten Informationen an die betroffenen Verkehrsteilnehmer stellt einen wichtigen Aspekt für die Realisierung der mit der KSE beabsichtigten Wirkungen dar. Die Reichweite, die Aktualität der Daten und der Zeitverzug von der Aktivierung bis zur Verarbeitung und Anzeige im Fzg. sind wichtige Parameter, die einen direkten Einfluss auf den Sicherheitszugewinn durch die KSE haben.

Bei der Nutzung der von der KSE bereitgestellten Informationen muss grundsätzlich unterschieden werden, ob die Bereitstellung der Informationen zeitkritisch ist oder nicht. Als zeitkritisch können hierbei solche Fälle bezeichnet werden, in denen sich Fahrzeuge mit relative geringem Abstand (<1km) auf die Störstelle zubewegen. Hier muss eine sichere

Warnung mit geringem Zeitverzug erfolgen, so dass den Fahrzeugen bzw. Fahrzeugführern genügend Zeit für eine angemessene Reaktion bleibt. Hierfür bietet sich der DSRC-Funk 802.11p als Schlüsseltechnologie der Smarten Kreuzung an, da mit dieser Technik sehr geringe Latenzzeiten erreicht werden.

Zeitunkritische Informationsverbreitungsszenarien im Kontext der KSE sind solche Fälle, in denen die Daten der KSE eher informativen Charakter haben. Solche Anwendungsfälle sind z.B. die in [23] beschriebene verkehrslageabhängige Zielführung. Hierbei wird entweder vor Fahrtantritt oder dynamisch bei Auftreten der Störung das Routing ggf. so angepasst, dass der entsprechende Verkehrsteilnehmer an der Störstelle vorbei geroutet wird. Die Verbreitung der Störstelleninformationen im WEB oder per Broadcastmedien wie dem TMC-Funk sind weitere Beispiele für eine zeitunkritische Informationsverbreitung der KSE -Daten. Für solche Fälle wurde die weiter oben beschriebene Verbreitungsform über den MDM und standardisierten Schnittstellen im Vorhaben realisiert.

In einem ersten Ansatz wurde für die Verbreitung der KSE -Gefahrenmeldungen per DSRC, die RSU als Funkrelay verwendet. Dies hatte vornehmlich praktische Gründe. Die RSU als fest installierte Infrastrukturkomponente verfügt über spezielle Antennen, die in einiger Höhe an einem Mast installiert sind und somit eine optimale Reichweite ermöglichen. Abhängig von baulichen Gegebenheiten sind Reichweiten bis 1km möglich. Ein auf dem Boden aufgestellter Leitkegel mit einfacher, rundstrahlender Antenne würde hier deutlich geringere Reichweiten erzielen. Die Verbreitung der Informationen über geonetzwerk-mechanismen (forwarding) könnte bei genügend großer Anzahl an ausgerüsteten Fahrzeugen Abhilfe schaffen. Dennoch bleibt das Problem, dass das erste bzw. die ersten Fahrzeuge eventuell nicht rechtzeitig gewarnt werden, sollte die Funkreichweite zu gering sein. Ein weiterer wichtiger Aspekt der für die RSU als Funkrelay gesprochen hat, ist die Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Entwicklung keine geeigneten Radiomodule existierten, die eine sinnvolle Integration in den Intelligenten Leitkegel erlaubt hätten. In naher Zukunft wird es aber auch möglich sein, intelligente Infrastrukturkomponente, wie den Intelligenten Leitkegel direkt mit 802.11p-DSRC-Funk auszustatten. DSRC-Module wie das MK5-Modul von Cohda Wireless [24] oder neuerdings das Theo-P1-Modul von u-blox [25] erlauben eine Integration in kleinere Embedded Systeme. Somit wäre der Intelligente Leitkegel für die Verbreitung seiner Daten per DSRC nicht mehr auf den Kreuzungsbereich und das Vorhandensein einer RSU beschränkt. Auch Einsatzszenarien und Einsatzgebiete wie der Überlandbereich oder aber auch auf Autobahnen würden sich somit erschließen.

Die überbrückbare Entfernung kann durch Übermittlung der eindeutigen geografischen Position der Gefahrenstelle – über geeignete Assistenzsysteme im Fahrzeug (Navigationsgerät, Bordcomputer usw.), Verkehrsmeldungen, Applikationen auf Mobilgeräten oder durch andere straßenseitige Verkehrseinrichtungen (dynamische Texttafeln) nahezu beliebig vergrößert werden.

### DSRC 802.11p KSE-DENM

Die Spezifikation der Decentralized Environmental Notification Message (DENM), welche von der KSE-Applikation über die RSU als Gefahrenmeldung an die Verkehrsteilnehmer (Fzg.) gesendet wird, erfolgte auf Basis von simTD – ASN.1 [26]. In naher Zukunft wird hier der ETSI-Standard ITS-G5(802.11p) [14] Anwendung finden. Bei der Spezifikation der KSE -DENM war zunächst zu prüfen, ob alle benötigten Informationen vollständig durch das entsprechende Nachrichtenformat abgedeckt werden, da sonst für die Spezifikation auf die Application Specific Data- (ASD)- Message ausgewichen werden müsste, was möglichst vermieden werden sollte. Ausgehend von einer Anforderungsanalyse mit den beteiligten Projektpartnern wurde eine vorläufige Anforderungsliste erarbeitet, aus der die folgende benötigte Informationen abgeleitet werden konnten, welche in der KSE-DENM kodiert werden müssen:

- Grund/Ursache der Hinderung,
- GPS-Position des IL als WGS-Koordinaten,
- Information bezüglich der Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit der IL-Position
- Aufsteller/Betreiber (Polizei, Feuerwehr, ...),
- Richtung bzw. fahrstreifengenaue Lokalisierung,
- Art der Hinderung (Fahrsreifen eingeengt, gesperrt, Anzahl der betroffenen Fahrsreifen, Vollsperrung, ...),
- Länge bzw. Ausdehnung der Hinderung,
- Entfernung bis zur Haltelinie im Kreuzungsbereich
- Verbreitungsgebiet der DENM (DestinationArea) für das Geonetworking

Für die Codierung von Information wie z.B. Aufsteller/Betreiber, Art der Hinderung oder Grund der Hinderung fand der TPEG-TEC-Standard [5] Anwendung. Transport Protocol Experts Group (TPEG)— Traffic Event Compact (TEC). Weiterhin wurde hier der Standard „ISO/TS 18234-4“ verwendet [27].

Die in der DENM codierten Informationen werden von den Fahrzeugapplikationen empfangen, ausgewertet und in entsprechende Warnungen/Anzeigen bzw. Handlungsempfehlungen umgesetzt. Eine solche Anzeige kann im einfachsten Fall darin bestehen, dass die Verkehrsstörung mit einer Entfernungsangabe in einem HMI angezeigt wird (siehe auch Abbildung 43). Eine passende Handlungsempfehlung könnte darin bestehen, dass ein rechtzeitiges Einfädeln bzw. Einordnen bei Sperrung vorgeschlagen wird. Darüber hinaus können die Informationen des KSE -Systems wichtige Eingangsgrößen für verschieden Assistenzsystem liefern. Genannt sei hier, der im Projekt UR:BAN entwickelte Kreuzungslotse. Auch das teil- und hochautomatisiertes Fahren kann von den sehr präzisen und aktuellen KSE-Informationen profitieren.

In der Integrations- und Testphase konnte die Verbreitung der KSE-Daten per DSRC-Funk erfolgreich getestet werden. Hierfür wurde von verschiedenen Automobilherstellern, wie z.B. VW und Opel, der UseCase Anzeige der Warnungsmeldung mit Entfernungsangabe im Fahrzeug-MMI realisiert (siehe auch Abbildung 44).



Abbildung 43: DENM der KSE, empfangen und angezeigt im Test- und Debug-HMI des Projektpartners VW (Zufahrt Hagenring aus Richtung Süden) mit korrektem Spurmatching

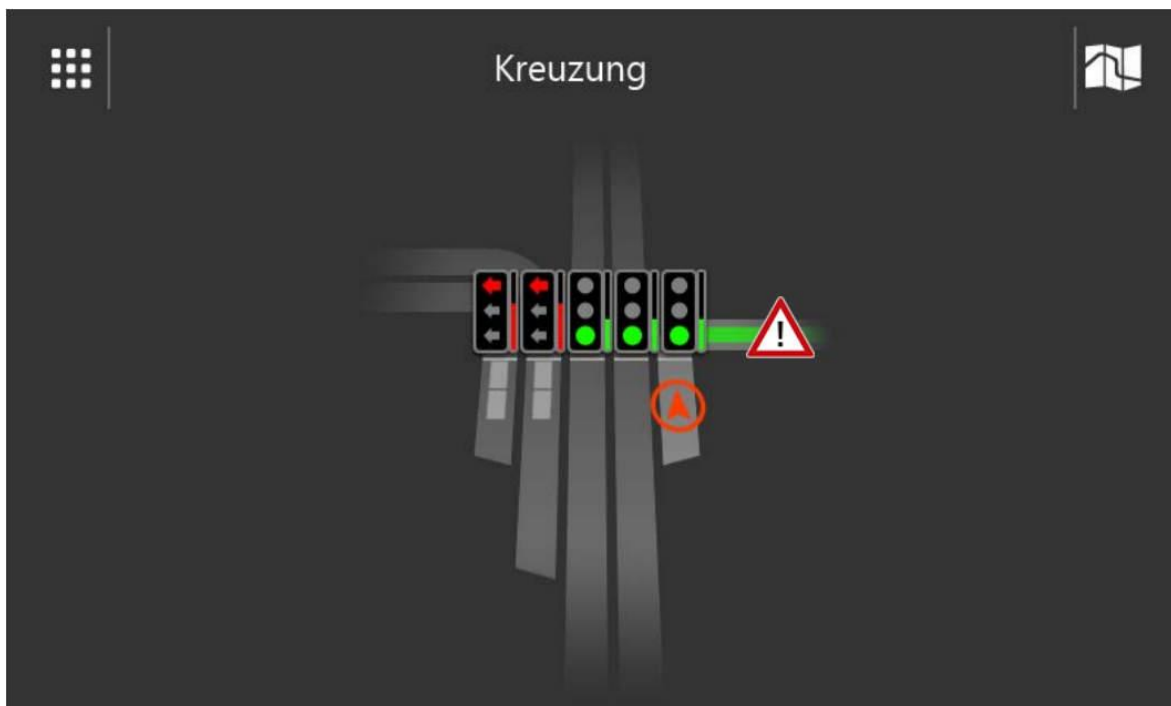


Abbildung 44: Anzeige des KSE-Warnung im HMI des VW-Versuchsfahrzug (Kreuzungslotse) während der UR:BAN-Abschlussdemonstration an der Messekreuzung in Düsseldorf

### 3.7 Konfigurations-App des Intelligenten Leitkegels

Im Forschungsvorhaben wurde eine weitere Applikation für die Kooperative Schutzeinrichtung entwickelt, die die Konfiguration der IL mittels Android-basierter Smartphones oder Tablets ermöglichen soll. Sie soll über den Funkstandard Bluetooth

kommunizieren und die Arbeit mit den Intelligenten Leitkegeln möglichst einfach und intuitiv gestalten. Der Grundgedanke war, dass der Aufsteller/Benutzer des IL die Konfiguration und das Auslesen der Leitkegel kabellos an jedem Einsatzort durchführen kann, ohne eine spezielle Hardware zu benötigen. Die Applikation bietet mehrere hilfreiche Funktionen, um dies zu ermöglichen. So können automatisch alle erreichbaren Leitkegel für eine Bluetooth-Verbindung bekannt gemacht werden (Pairing). Die Konfiguration kann ebenfalls automatisch für erreichbare Leitkegel durchgeführt und für einzelne Leitkegel ausgelesen werden. Außerdem kann die Akkuspannung und andere für die Funktion wichtige Statuswerte der einzelnen IL angezeigt werden.

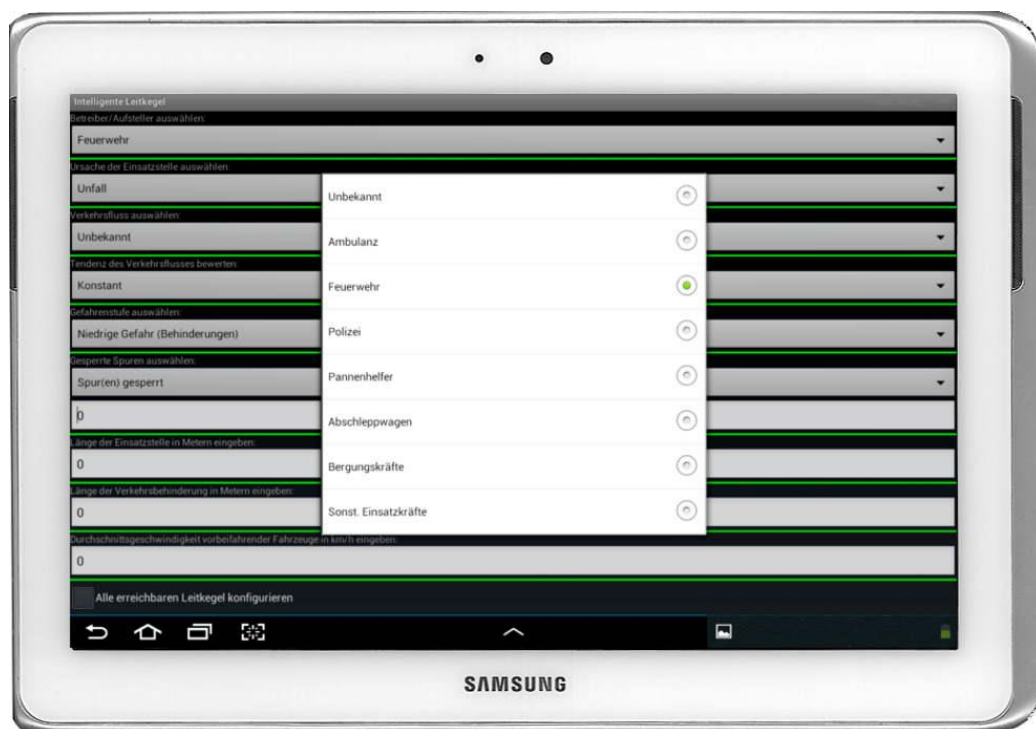


Abbildung 45: Konfiguration der Intelligenten Leitkegel per Bluetooth, mit der Android-App auf einem SAMSUNG-Tablet

Als Datenaustauschformat zwischen IL und Konfigurations-App wurde wieder das JSON-Format gewählt, da es ein einfaches, lesbares Format ist, das mit geringem Overhead auskommt. Darüber hinaus stehen sowohl für Android (Konfigurations-App) und Linux (IL) entsprechende Parser und Bibliotheken zur Verfügung, die das Handling mit diesem Datenformat besonders einfach gestalten.

Die Konfigurationsdaten-Spezifikation basiert auf der weiter oben vorgestellten Spezifikation der KSE-DENM (siehe auch Abschnitt 3.6 und [18]) und ist in dem nachfolgenden Code-Auszug dargestellt.



```
{
  "ITC_TrafficConfig": {
    "Event": {
      "CauseCode": 2,
      "DirectCause": {
        "LaneRestriction": 2,
        "LengthEffectuated": 25,
        "NumberOfLanes": 1,
        "Severity": 3,
        "SubCause": 2
      },
      "TrafficFlowEffect": {
        "AverageSpeedAbsolute": 4,
        "EffectCode": 1,
        "LengthAffected": 1,
        "Tendency": 4
      }
    },
    "Operator": 3
  }
}
```

Hier finden sich viele der in der KSE-DENM eingeführten Datenelemente wieder, die bei erfolgreicher Konfiguration übernommen werden, um somit eine vollständige und standardisierte Störstellenbeschreibung zu generieren

Eine etwas genauere Beschreibung der wichtigsten Datenelemente kann in Tabelle 2 eingesehen werden. Genau wie die KSE-DENM, ist auch die IL-Konfiguration an den TPEG-TEC-Standard angelehnt und nutzt ausgewählte Tabellen, um die verwendeten Datenelemente zu beschreiben.

Tabelle 2: Parameter für die IL-Konfiguration nach dem TPEG-TEC-Standard

Parameter	Information
Betreiber/ Aufsteller <b>(Operator)</b>	Unbekannt, Ambulanz, Feuerwehr, Polizei, Pannenhelfer, Abschleppwagen, Bergungskräfte, Sonstige Einsatzkräfte
Verkehrsfluss <b>(EffectCode)</b>	Unbekannt, Freier Verkehrsfluss, Langsamer Verkehrsfluss, Kein Verkehrsfluss
Tendenz des Verkehrsflusses <b>(Tendency)</b>	Konstant, Zunehmend, Abnehmend
Länge der Verkehrsbehinderung <b>(LenghtAffected)</b>	Angabe in Meter
Durchschnittsgeschwindigkeit <b>(AverageSpeedAbsolute)</b>	Angabe in Kilometer pro Stunde
Ursache der Störstelle <b>(CauseCode)</b>	Unfall, Bauarbeiten, Fahrbahnverengung, Defekte Fahrzeuge, Bergungsarbeiten, Behördliche Maßnahmen, Veranstaltung, Polizeikontrolle
Gefahrenstufe <b>(Severity)</b>	Niedrige Gefahren (Behinderung), Mittlere Gefahr, Hohe Gefahr
Länge der Störstelle <b>(LengthEffectd)</b>	Angabe in Meter
Gesperrte Spuren <b>(LaneRestriction)</b>	Spur(en) gesperrt, Spur(en) geöffnet, Rechte Spur(en) gesperrt, Linke Spur(en) gesperrt
Anzahl gesperrter Spuren <b>(NumberOfLanes)</b>	Angabe der entspr. Anzahl

Die Konfiguration kann grundsätzlich ausgelesen und geschrieben werden. Beim Auslesen werden die aktuellen Inhalte der auf dem Leitkegel gespeicherten Konfigurationsdatei zurückgelesen und decodiert. Sie werden dann in die Auswahl- und Eingabefelder des Konfigurationsmenüs eingetragen (siehe auch Abbildung 45). Beim eigentlichen Konfigurieren des/der IL werden die Daten zuerst geschrieben und anschließend zurückgelesen und miteinander verglichen. Sollte es Abweichungen aufgrund von

Übertragungsfehlern geben, wird dies dem Anwender mitgeteilt und automatisch die vorherige Konfiguration als Backup geschrieben.

Auch das Format für den Austausch der schon erwähnten Statusdaten des IL wurde mit JSON realisiert. Im Unterschied zu den Konfigurationsdaten können die Statusdaten allerdings nur gelesen werden.

### 3.8 GNSS-module und präzise Lokalisierung

Eine der wichtigsten Funktionen des IL ist die selbstständige Verortung im Straßenraum. Die genaue geographische Position des IL bildet neben einigen anderen Informationen die Grundlage für die korrekte Beschreibung einer temporären Störstelle. Die fahstreifenfeine Lokalisierung mit Submeter-Genauigkeit stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar. Auch der innerstädtische Einsatz des IL, wie er z. B. an Kreuzung zu erwarten ist, stellt aufgrund von Abschattungen, Mehrwegeausbreitungen und anderen Störungen hohe Anforderungen an das Ortungsmodul. Die zuvor für das Gesamtsystem spezifizierten Randbedingungen, wie geringer Energieverbrauch, Schock- und Temperaturfestigkeit und nicht zuletzt Kosteneffizienz für das Gesamtsystem stellen eine weitere Herausforderung bei der Lösung der Positionierungsaufgabe dar.

Im Forschungsvorhaben wurden mehrere Lösungsansätze verfolgt und eingehend untersucht. Hierbei erwiesen sich das Real Time Kinematic- (RTK)- und Precise Point Positioning (PPP)-Verfahren als besonders vielversprechen.

#### RTKLIB Software Paket

Standard LowCost GNSS-Module, wie sie heutzutage in vielen Geräten anzutreffen sind, berechnen die Position durch Auswertung von Codedaten und geben die ermittelten Positionsdaten meist an einer seriellen Schnittstelle als National Marine Electronics Association- (NMEA)-sentences aus, wo sie dann von den verschiedenen Anwendungen weiter verarbeitet werden.

Abgesehen von der Tatsache, dass die Positionierungsgenauigkeit solcher Module mit ca. +/- 10 Metern in einem inakzeptablen Bereich für die fahstreifenfeine Ortung liegt, kann der im Modul fest encodierte Algorithmus für die Positionierung weder eingesehen noch angepasst werden. Hier musste nach anderen Lösungen gesucht werden.

Eine mögliche Lösung stellte die Nutzung des RTKLIB Software Paketes [3] dar. Diese Software Paket stellte, in Verbindung mit dem Einsatz geeigneten GNSS-Module, einige unverzichtbare Vorteile in Aussicht, besonders während der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Vorhaben. Die wichtigsten Vorteile seien hier kurz genannt:

- Alle bekannte Auswerteverfahren können frei gewählt werden (DGNSS, RTK, PPP, ...)
- Quelloffen und anpassbare Algorithmen
- Umfangreiche Log- und Auswertemethoden verfügbar
- Unterstützt die meisten und wichtigsten Standardformate und Protokolle für GNSS

- Die verschiedenen Auswerteverfahren können vollumfänglich parametrisiert werden
- Die erzielten Ergebnisse können grafisch aufbereitet werden
- Freizügige Open-Source-Lizenz (BSD 2-clause license)
- Echtzeitberechnung und Postprocessing möglich

Ein weiteres Open Source multi-stream-client-Programm, entwickelt für verschieden Echtzeit GNSS-Anwendungen, ist das Programmpaket BKG Ntrip Client (BNC), welches im Vorhaben allerdings nicht eingehender untersucht wurde.

### **Auswahl geeigneter GNSS-Module**

Multi-GNSS-Module sind in der Lage, mindestens 2 unabhängige Satellitensysteme parallel zu empfangen und auszuwerten, was zu einer Verbesserung der Positionsgenauigkeit und Erhöhung der Positionsverfügbarkeit führt. Moderne GNSS-Module können die derzeit bestehenden Satellitensysteme wie z. B. GPS, GLONASS und SBAS empfangen. Darüber hinaus existieren bereits Module, die zusätzlich auch im Aufbau befindliche Satellitensysteme wie Galileo- und Compass(BeiDou)-Signale berücksichtigen können und somit eine weitere Verbesserung der Positionsbestimmung in Aussicht stellen.

Low-Cost RTK/PPP-Verfahren, wie sie in [28] und [29] beschrieben werden, sind prädestiniert für das vorgestellte System. Da sich die Position des IL nach dem Aufstellen im Straßenraum nicht mehr ändert, kann mittels Postprocessing [3] [30] die geforderte Genauigkeit erreicht werden. Die hierfür benötigten Rohdaten werden von einigen GNSS-Modulen bereitgestellt, was wiederum ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl eines geeigneten Multi-GNSS-Moduls darstellt.

Die wichtigsten Kriterien für die Auswahl eines GNSS-Moduls waren:

- Verarbeitung von GPS-, GLONASS-, SBAS- und GALILEO-Signalen.
- Unterstützung von Korrekturdaten im RTCM 2.x, 3.x -Format.
- Unterstützung von DGNSS-Prozessierung.
- Unterstützung von RTK- und PPP-Verfahren
- Unterstützung durch RTKLIB
- Code- und Phasenrohdatenausgabe
- Geringer Preis
- Kleine Baugröße bzw. Formfaktor
- Verfügbarkeit
- Geringe Stromaufnahme

Geeignete Technologien und hochgenauen Positionsbestimmung existieren bereits oder werden stetig weiterentwickelt. Geodätische Mehrfrequenzempfänger für hochgenaue Verortung kosten nicht selten mehrere tausend Euro, was sie für das vorgestellte System unbrauchbar macht. Die technologische Herausforderung im Vorhaben bestand vor allem in der spurfeinen Ortsbestimmung im Verkehrsraum, mittels LowCost Einfrequenz- GNSS-Empfänger. Solche LowCost-Module, wie sie in Abbildung 46 dargestellt sind, kosten als Einzelstück ohne Rabatt ca. 20 - 60 Euro. Im Gegensatz zu noch günstigeren Modulen bieten diese Module die Möglichkeit, die Code- und Phasenrohdaten direkt als Rohdatenstrom

auszugeben, was eine Grundvoraussetzung für die weiter unten beschriebenen Positionsbestimmung nach dem PPP- und RTK-Verfahren mittels RTKLIB ist und , was sie für das vorgestellte System besonders interessant macht.

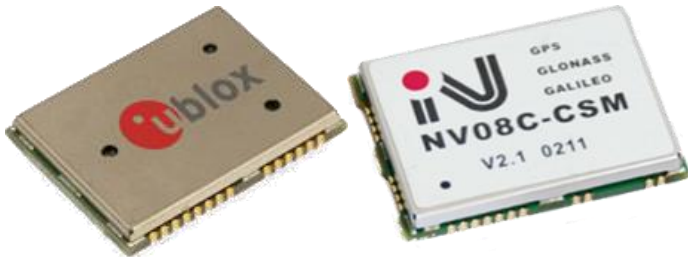


Abbildung 46: GNSS-Module für den IL, u-blox NEO-M8N und NVS-Technologies NVS08CSM

Im Forschungsvorhaben wurden die Module des Herstellers NVS-Technologies und des Herstellers u-blox ausgewählt und eingehend untersucht, da sie die benötigten Eigenschaften aufwiesen. Der Hersteller u-blox als führendes Unternehmen im Bereich von Modulen und Chips für die Positionierung, bietet eine ganze Produktpalette an Positionsmodule an. Hier hat sich besonders die Produktreihe „NEO“ als vielversprechend erwiesen, so dass im Vorhaben verschiedene Module und Modulgenerationen dieser Reihe untersucht wurden. Hierzu wurde in einem ersten Schritt eine universelle Hardware in Form einer GNSS-Adapter-Platine entwickelt, die es ermöglichte, verschiedene Module zu untersuchen bevor die eigentliche Entwicklung der IL-Hardware durchgeführt wurde.

### Entwicklung einer universellen GNSS-Adapter-Platine

Die schnell voranschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der GNSS-Ortungsmodule macht eine ständige Beobachtung dieses Marktes unabdingbar, besonders, da die Ortungsqualität ein wesentliches Merkmal des Intelligenten Leitkegels ist. Getrieben durch den Handy- und Smartphone-Markt, werden fast im halbjährlichen Rhythmus neue und noch leistungsfähigere Ortungsmodule vorgestellt, deren Eignung für den Intelligenten Leitkegel parallel zur Entwicklung des IL-Prototypen geprüft wurde, um adäquat auf neue Entwicklungen reagieren zu können. Somit ist es auch zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt mit geringem Mehraufwand möglich, besser geeignete Ortungsmodule zu evaluieren und einzusetzen.

Im Vorhaben wurden in diesem Zusammenhang weitere GNSS-Ortungsmodule des Herstellers u-blox besorgt und getestet. Hierfür war die Entwicklung und Fertigung entsprechender Platinen nötig, um die Performancetests der Module durchführen zu können (Abbildung 47).

Als Schnittstelle zu einem PC oder Laptop kam eine USB-Verbindung zum Einsatz, was größtmögliche Flexibilität sicherstellte.

Auch die Stromversorgung des Moduls und der angeschalteten, aktiven Antennenhardware erfolgte über die USB-Kabelverbindung, so dass im Feld keine zusätzliche Stromversorgung z.B. in Form einer Batterie oder eines Akkus erfolgen musste.

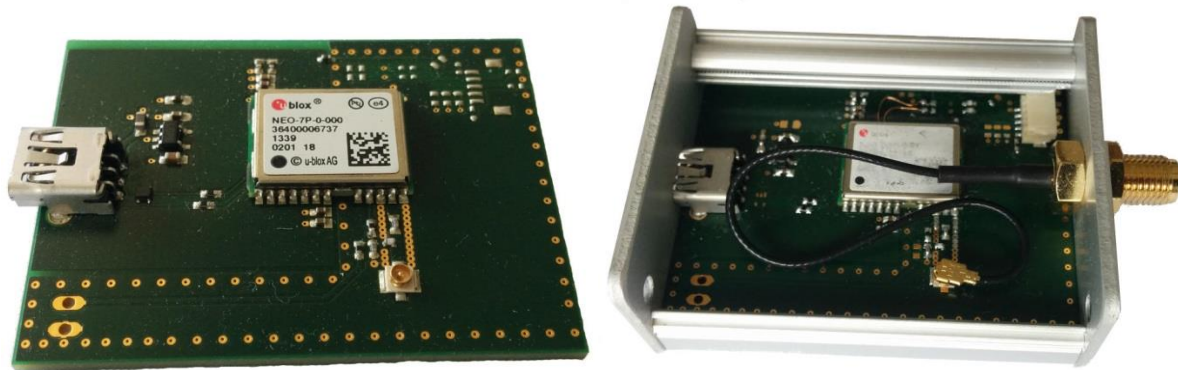


Abbildung 47: entwickelte universelle GNSS-Adapter-Platine und Gehäuseintegration

Als besonders hilfreich bei der Entwicklung der Hardware erwies sich die Tatsache, dass die unterschiedlichen Ortungsmodule zueinander Pin-kompatibel sind und somit der Entwicklungsaufwand für die Untersuchung verschiedener Module nur einmalig betrieben werden musste. Das Design der universellen GNSS-Platine wurde zweckmäßigerweise dahingehend optimiert, dass eine einfache Integration in ein Standard-Gehäuse erfolgen konnte. Dies ermöglichte einen ausreichenden Schutz der Hardware unter den verschiedenen widrigen Bedingungen, wie sie bei den Feldtests anzutreffen waren.

Die Arbeiten, die im Rahmen der Entwicklung der universellen GNSS-Hardware geleistet wurden, sowie die dabei gewonnen Erkenntnisse, fanden direkten Eingang in die Entwicklung der eigentlichen IL-Hardware in Form der IL-Basisplatine.

### Positionierung mit der Static PPP-Verfahren

Precise Point Positioning ist eine GNSS-Auswertetechnik zur präzisen Positionsbestimmung, die im Gegensatz zu herkömmlichen, differenziellen Verfahren ohne Korrekturdaten einer Referenzstation bzw. eines Referenzstationsnetzes auskommt. Allerdings erfordert dieses Verfahren neben der Berücksichtigung zahlreicher Korrekturen die Einführung präziser Satellitenbahn- und Uhrendaten. Für PPP ergeben sich zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. Es kann zur präzisen statischen Punktbestimmung oder zur kinematischen Positionsbestimmung von bewegten Objekten wie z. B. Satelliten, Flugzeugen, Schiffen und Bojen eingesetzt werden [31].

Grundsätzlich sind mit einem professionellen Zweifrequenzempfänger bessere Ergebnisse möglich, als mit einem handelsüblichen Einfrequenzempfänger. Aber auch mit günstigen Empfängern sind gute Ergebnisse erzielbar, insbesondere bei Messungen im Stillstand und längerer Wartezeit, wie im Falle des Intelligenten Leitkegels, weil die errechnete Position, mit gewissen Schwankungen, immer näher zu seiner wahren Position konvergiert.

Die wesentlichste Einschränkung von PPP im Vergleich zu differenziellen Auswertetechniken (Real-Time Kinematic, RTK) ist die deutlich längere Konvergenzzeit.

PPP arbeitet mit verschiedenen Korrekturmodellen, um die verschiedenen Fehlerquellen zu minimieren. Je nach Algorithmus und verfügbaren Daten, können unter anderem, folgende Faktoren in das Korrekturmodell miteinbezogen werden:

- Korrektur der Phasenbeobachtungen aufgrund der Abweichung von Phasenfront und Rotation (Lage- und Höhenfehler von einigen mm)
- Korrektur der Koordinaten wegen der Verformung der Erde durch Gezeitenkräfte (Höhenfehler von bis zu einigen dm, Lagefehler von bis zu einigen cm)
- Korrektur von küstennahen Stationen wegen der Reaktion der Erdoberfläche auf die Belastung der ozeanischen Gezeiten (Höhenfehler von bis zu 5 cm)
- Korrektur wegen der Verlagerung der Erdachse bezüglich der Erdkruste (Lagefehler von wenigen cm)
- Eliminierung des Laufzeitverzögerungs-Fehlers in der Ionosphäre
- Eliminierung des Laufzeitverzögerungs-Fehlers in der Troposphäre (Berücksichtigung vom atmosphärischen Druck, Wasserdampfpartialdruck und Temperatur)

Für die Positionsbestimmung nach dem PPP-Verfahren werden präzise Ephemeriden und Uhrkorrekturen benötigt. Diese Produkte werden vom International GNSS Service (IGS) und von den verschiedenen Analytical Centers(ACs) des IGS oder dem European Space Operations Center (ESOC) kostenlos zur Verfügung gestellt.

Darüber hinaus werden die benötigten Bahn- und Uhrenkorrekturen auch als Broadcast über das Satellite Based Augmentation System (SBAS) Satellitensystem ausgesendet. In Europa ist hier das European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)-System zuständig. SBAS liefert zusätzliche Informationen, die von geosynchronen, meistens geostationären Satelliten ausgestrahlt werden und Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Verfügbarkeit der Positionsbestimmung erhöhen.

Vorteil bei der Verwendung der SBAS-Korrekturen ist, dass keine Kosten für den eigentlichen Service und für die Übertragung der Daten z.B. per Mobilfunk anfallen, da die Übertragung über das Satellitensystem durch den GNSS-Empfänger direkt erfolgt.

Nachteilig ist, dass Korrekturen in Qualität und Aktualität nicht an die Korrekturen vom IGS heranreichen, was dann zu einer etwas schlechteren Positionslösung führt. Da die Positionsgenauigkeit, die mit den SBAS-Korrekturen erreicht wurden, auch im Sub-Meter-Bereich genau sind und diese Genauigkeit für die spurfeine Lokalisierung des IL durchaus ausreichend ist, könnte dieser Variante im produktiven Einsatz der Vorzug gegeben werden.

Ein weiterer Nachteil bei der Verwendung der SBAS-Systems, besonders beim Einsatz des IL in urbanen Gebieten, ist die geostationäre Ausrichtung des entspr. Satelliten. Hier kann es durch hohe Gebäude zur Abschattung kommen und so der Empfang der SBAS-Daten verhindert werden.

Eine entsprechende Strategie, die sich in UR:BAN als sinnvoll erwiesen hat, und zu guten bis sehr guten Ergebnissen geführt hat, ist letztendlich die Kombination aus SBAS- und IGS-basierter Korrektur der Positionsberechnung. Hierbei wird im ungestörten Fall (guter SBAS-Empfang) auf die SBAS-Korrekturen zurückgegriffen und nur wenn kein SBAS-Empfang möglich ist, werden die aktuellen Korrekturdaten vom IGS-Server heruntergeladen und für die Positionsberechnung verwendet.

Mit den entsprechenden Code- und Phasenbeobachtungsdaten, die von einigen LowCost-Einfrequenzempfängern im Rohdatenmodus zur Verfügung gestellt werden, den präzise Satellitenbahn- und Uhrendaten sowie verschiedenen, erforderlichen Korrekturen, sind cm-genaue Positionsberechnungen möglich (siehe auch Abbildung 50).

### **Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS) und Real Time Kinematic (RTK)**

Im Vorhaben wurden alternativ auch Versuche nach dem Differential-GNSS-Verfahren und dem RTK-Verfahren durchgeführt.

DGPS (verallgemeinert DGNSS) ist ein Verfahren, bei dem der Empfänger zusätzlich ein Korrektursignal von einer Referenzstation erhält. Diese Referenzstation besteht auch aus einem weiteren GPS-Empfänger, dessen Position sehr genau bekannt ist. Aus der bekannten Position und der momentan errechneten Position findet die Referenzstation heraus, wie stark die GPS-Signale aktuell beeinträchtigt/verfälscht sind. Hierbei werden die Codemessungen korrigiert, was zu einer Genauigkeit von 50 cm bis 1 Meter je nach Präzision der GNSS-Empfängerhardware führt.

Real Time Kinematic (RTK) ist ein Verfahren, welches bei einem bewegten Empfänger sehr genaue Positionierungsergebnisse liefert. Wie beim DGPS/DGNSS werden auch hier Korrekturdaten einer feststehenden Referenzstation oder besser Referenzstationsnetzwerk empfangen und in Echtzeit verarbeitet. Beim RTK-Verfahren werden zusätzlich zu den Codekorrekturen, die deutlich präziseren Phasenmessungen ausgewertet und korrigiert um Mehrdeutigkeiten bei der Berechnung in Echtzeit herauszurechnen, was eine Genauigkeit von ca. 2 cm in Echtzeit möglich macht.

Realtime (Echtzeit) und Postprocessing (Nachverarbeitung) sind entgegengesetzte Begriffe. Bei Realtime stehen die Resultate nach max. 1-3 Sekunden Verzögerung bereit. Postprocessing erzeugt Resultate im Nachhinein. Die im Vorhaben versendete RTKLIB beispielsweise ist eine Real-time Software, die darüber hinaus, auch das Postprocessing beherrscht.



### **DGNSS/RTK mit kommerziellen Korrekturdaten**

Verschiedenen Anbieter, wie z.B. Axio-Net oder SAPOS betreiben kommerzielle Referenzstationsnetzwerke, die in verschiedenen Diensten passgenaue Korrekturdaten berechnen und zur Verfügung stellen. Nachteilig sind hier die zusätzlich anfallenden Kosten für den Betrieb. Zusätzlich zu den höheren Kosten für die Korrekturdatenübertragung per Mobilfunk fallen weitere laufende Kosten für die Nutzung des Korrekturdatenservices an.

Im Forschungsvorhaben wurden auch Untersuchungen und Versuche mit kommerziellen Korrekturdaten aus dem SAPOS-Referenzstationsnetzwerk durchgeführt. Hierzu wurde ein kostenfreier Testzugang beim LVerGeo (Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt) für die Dauer von einem Monat beantragt, welcher auch freundlicher Weise genehmigt wurde. Die Versuche dienten vorrangig der Evaluierung der erzielbaren Positionierungsgenauigkeit. Da sich bei den Experimenten herausgestellt hat, dass mit dem beantragten HEPS-Dienst hervorragende Ergebnisse erzielt werden können, wurde in der Folge mit diesem Dienst auch als Referenzmessung gearbeitet.

Dies war immer dann von großem Nutzen, wenn in den Prüf- und Testfeldern kein genau eingemessenes Referenzsystem, wie im Galileo-Testfeld-Magdeburg, zur Verfügung stand.

#### **Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service (HEPS):**

Der HEPS-Service bietet Positionierung in Echtzeit mit 1 bis 2 Zentimeter Genauigkeit in der Lage und 2 bis 3 Zentimeter Genauigkeit in der Höhe.

Zusätzlich zu den Codekorrekturen stehen dem Nutzer auch die Trägerphasenkorrekturen der Satellitensignale in Echtzeit zur Verfügung. Damit wird eine sehr genaue Positionsbestimmung mit dem RTK-Verfahren ermöglicht.

Die Korrekturdaten werden unter anderem über das Internet mit dem Protokoll NTRIP im Sekundentakt abgegeben.

Ein wesentlicher Nutzen von SAPOS-HEPS für die Experimente in den Prüf- und Testfeldern lag darin, dass bereits im Feld endgültige und sehr genaue Koordinaten vorlagen und somit keine Nachbearbeitungen z.B. durch Postprocessing-Verfahren nötig wurden.

### **DGNSS mit RSU als Basisstation**

Da die Untersuchungsergebnisse mit dem DGNSS-Ansatz unter Verwendung kommerzieller Korrekturdaten sehr positive Ergebnisse für die schnelle und präzise Verortung der Intelligenten Leitkegel erbracht hatten, bestand nun die Idee darin, die RSU der Smarten Kreuzung, deren Position ja sehr genau bekannt und konstant ist, als GNSS-Basisstation für die Verortung der Intelligenten Leitkegel im direkten Umfeld zu nutzen. Zu diesem Zwecke muss die RSU, die nun auch mit einem GNSS-Empfänger ausgerüstet wird, Korrekturdaten an die IL schicken, welche diese zur Berechnung ihrer Eigenen Position verwenden. Weiterhin wurde die RSU um Softwarekomponenten erweitert, die es ermöglichen, Korrekturdaten zu

erzeugen und zu versenden. Da die für den Austausch der Korrekturdaten benötigte Datenverbindung ohnehin für Übertragung der Gefahrenmeldungen an die RSU besteht, ist dieser Ansatz eine gute Alternative zum etwas langsameren PPP-Ansatz. Verschiedene Tests mit diesem Ansatz erbrachten sehr positive Ergebnisse und ermöglichten eine Positionierungsgenauigkeit im Zentimeter-Bereich nach nur wenigen Minuten. Nachteilig ist das relative hohe Datenaufkommen bei der Übertragung der Korrekturdaten. Dieser kritische Punkt muss berücksichtigt werden, da hier für die Mobilfunkkommunikation erhöhte Kosten anfallen können. Bei entsprechend günstigen Mobilfunktarifen bzw. Datenflatrates kann und sollte dieser Ansatz berücksichtigt werden.

### **Alternative Lösungen mit LowCost-PPP/RTK-Modulen**

RTK-Technologien werden seit einiger Zeit in Nischenmärkten mit kleinen Stückzahlen, wie im Vermessungs- und Bauwesen eingesetzt. Aus Kosten- und Komplexitätsgründen ist diese fortschrittliche Positionierungstechnologie für die meisten anderen Anwendungsfälle bislang nicht in Betracht gekommen. Aufstrebende Wachstumsmärkte mit hohen Stückzahlen wie der Bereich unbemannte Fahrzeuge erfordern höchste Präzision sowie Energieeffizienz und niedrige Kosten. Andere Anwendungsbereiche sind die Landwirtschaft und robotergestützte Systeme wie Traktoren oder Roboter-Rasenmäher. Mit Modulen wie dem NEO-7P oder dem NEO-M8P von u-blox soll der Bedarf an einer kleinen, kostengünstigen und hoch präzisen RTK-basierten Modullösung gedeckt werden.

Hier zeigt sich für den im Vorhaben entwickelten Ansatz eine interessante Entwicklung auf dem Gebiet der hochpräzisen Ortung auf.

### **NEO-7P, PPP-Modul**

Das NEO-7P-Modul von u-blox nutzt ein einziges Frequenzband und erzielt dank integriertem PPP-Algorithmus eine Genauigkeit im Sub-Meter-Bereich.

Innerhalb des SBAS-Empfangsbereichs kann das Modul für die meisten Outdoor-Anwendungen voll autonom eine Genauigkeit von unter 1 Meter erreichen.

Auch dort, wo keine Daten von SBAS-Erweiterungssystem empfangen werden können, ermöglicht das Modul Neo-7P durch die Nutzung von differentielltem GPS als Alternative zu PPP eine sehr präzise Positionsbestimmung. Hierbei verwendet das Modul RTCM-Korrekturdaten, die von einer lokalen Referenzstation oder einem Referenzstationsnetz z.B. über die serielle Schnittstelle übermittelt werden. So können Messfehler, die durch atmosphärische Störungen und Abweichungen bei Satelliten-Umlaufbahnen und -Uhren verursacht werden, berichtigt werden.

Die vom Hersteller angegebene Genauigkeit konnte in ausführlichen Tests im Galileo-Testfeld nachgewiesen und bestätigt werden.

### **NEO-M8P, RTK-Modul**

Das NEO-M8P ist das kleinste GNSS RTK Hochpräzisionsmodul, das es derzeit am Markt gibt. Es basiert auf satellitengestützten Navigationssystemen mit GPS und GLONASS. Wie beim RTK-Verfahren üblich, empfängt der Rover mit dem NEO-M8P-0 Korrekturdaten vom Basis-/Referenzempfänger NEO-M8P-2 über eine Kommunikationsverbindung, die das RTCM-Protokoll verwendet und ermöglicht somit eine zentimetergenaue Positionierung. Wie beim NEO-7P ist auch beim NEO-M8P die RTK-Algorithmen bereits in das Modul integriert. Dadurch fallen Größe und Gewicht des Moduls erheblich geringer aus und auch der Stromverbrauch beträgt nur ein Bruchteil des Verbrauchs von bereits vorhandenen Lösungen. Das spart Kosten und verbessert die Praxistauglichkeit deutlich. Mit dem Modul können F&E-Aufwendungen weiter reduzieren werden, da keine umfangreichen Ressourcen und Zeit in die Entwicklung einer internen RTK-Lösung auf einem separaten Mikroprozessor-System investieren werden müssen.

Obwohl die vorgestellten und getesteten Module NEO-7P und NEO-M8P bis dato noch um einen Faktor drei bis vier teurer sind als Standard Einfrequenz-GNSS-Module, stellen sie doch eine interessante Alternative dar. Bei der Verwendung solcher Module könnte ggf. auf den Einsatz eines separaten Mikrocontrollers zur Berechnung der Position mit der RTKLIB verzichtet werden, was die Komplexität, den Preis und die Energieaufnahme des Gesamtsystems weiter verringern würde. Hier bleibt abzuwarten, ob diese Module tatsächlich den Weg in den Massenmarkt finden, was sicherlich einen positiven Einfluss auf das Preisgefüge haben würde und sie für den IL besonders attraktiv machen würde.

### **Ausgewählte Positionierungsergebnisse**

Abschattung, Mehrwegeausbreitung und verschiedene andere, negative Effekte, wie sie in urbanen Kreuzungsbereichen zu erwarten sind, verschlechtern den GNSS-Empfang erheblich und haben einen negativen Einfluss auf die Positionierungsgenauigkeit des Intelligenten Leitkegels. Zu diesem Zwecke wurden an ausgesuchten Kreuzungen umfangreiche Performancetest mit der realen IL-Hardware aber auch mit den verschiedenen entwickelten Testempfängern durchgeführt. Hierbei wurden auch Worst Case-Szenarien untersucht und ausgewertet.

In Abbildung 48 ist beispielhaft ein Positionierungsergebnis dargestellt, wie es bei einem der zahlreichen Test im Prüffeld Braunschweig erzielt wurde. In der entsprechenden Abbildung werden die berechneten Positionslösungen in der X-Y-Ebene grafisch dargestellt. In Abbildung 48 ist der in der Zufahrt zur Forschungskreuzung K-047 positionierte IL zu sehen. Bei diesem Test konnte vorteilhaft eine Baustellensituation auf dem Rebenring ausgenutzt werden, um eine Störstellensituation unter realen Bedingungen auszumessen, ohne zusätzliche Behinderungen des Verkehrs während der Tests zu provozieren. In der erwähnten Positionierungsgrafik stellt die gelbe Kurve die vom Intelligenten Leitkegel

berechneten Positionslösungen dar. Die blaue Kurve wurde nachträglich im Postprocessing-Verfahren errechnet, basierend auf den Satelliten-Rohdaten und präziseren Korrekturdaten und diente der weiteren Ergebniskontrolle.

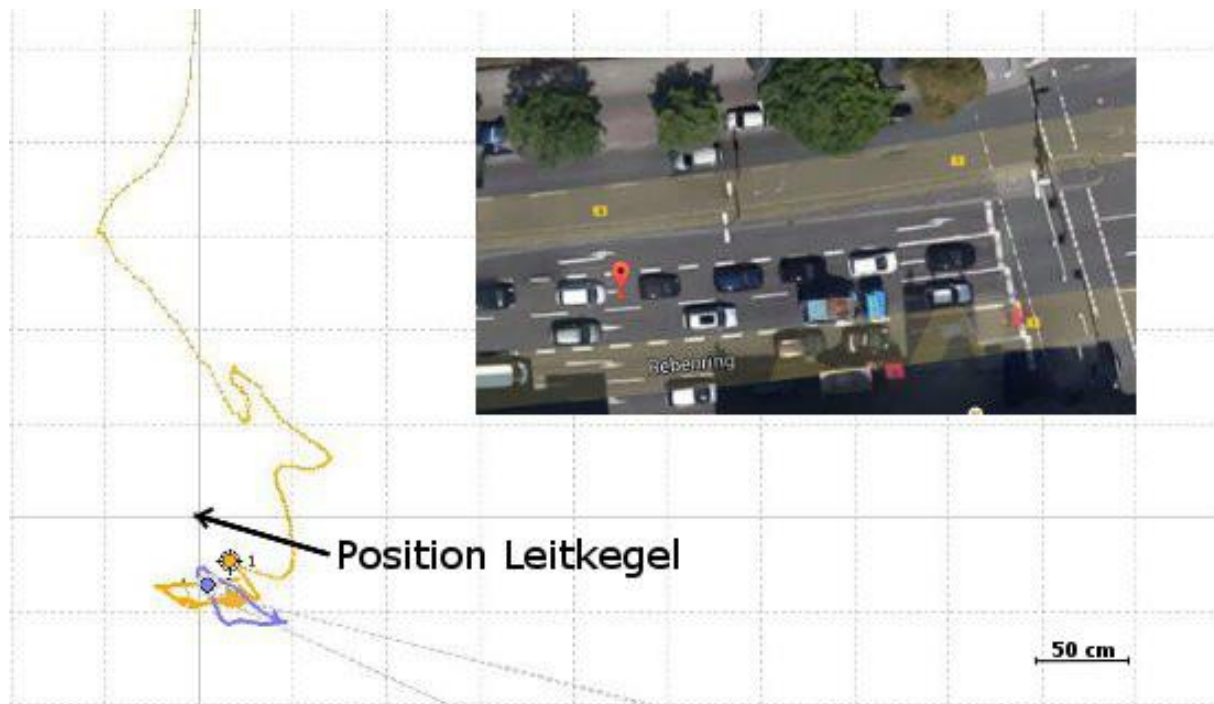


Abbildung 48: Positionierung des Leitkegels in der Zufahrt Rebenring aus Richtung Westen an der K-047 im Prüffeld Braunschweig (gelb: Echtzeit-Position, berechnet im Leitkegel mit dem PPP-Verfahren; blau: Position im Postprocessing-Verfahren, basieren auf RAW- und Korrekturdaten)

Die wahre Position des Leitkegels, die in der angezeigten Grafik im Koordinatensprung liegt, wurde mit sehr präzisen, Mehrfrequenz-Referenzempfängern und unter Verwendung von Korrekturdaten aus dem SAPOS-Referenzstationsnetzwerk (siehe auch Abschnitt „DGNS/RTK mit kommerziellen Korrekturdaten“ weiter oben) ermittelt und diente als Bezugspunkt für die Errechnung der Positionsabweichung, welche hier als ein Maß für die technische Bewertung des Systems dienen soll.

Zu ersehen ist, dass Positionslösungen errechnet werden, die im Sub-Meter Bereich genau sind. Nach wenigen Minuten wird sogar eine Absolute Abweichung von weniger als 50 cm erreicht. Dieses Maß an Genauigkeit erlaubte während der Tests ein sicheres Matching auf die TOPO der Forschungskreuzung K-047. Dieses Ergebnis konnte auch in weiteren Kreuzungsarmen der K047 bestätigt werden. Auch hier konnten aktuelle Baustellensituationen vorteilhaft für die Tests ausgenutzt werden.

Da die KSE erst dann Gefahrenmeldungen erzeugen und versenden kann, wenn alle Parameter korrekt erfasst sind, so auch die genaue Beschreibung der betroffenen Fahrstreifen, ist die Zeit, die benötigt wird, vom Aufstellen des Intelligenten Leitkegels bis zu

dessen Fahrstreifenfeinen Verortung, ein entscheidenden Merkmal für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems KSE (SK-35). Anzustreben ist natürlich, dass diese Zeit so gering wie möglich ausfällt bzw. gegen Null geht, da die Gefahrenmeldung möglichst schnell, möglichst viele Verkehrsteilnehmer erreichen soll.

Dem sind aber technische Grenzen gesetzt, die in dem hier vorgestellten System, maßgeblich durch die für die Positionierung benötigte Zeit gegeben sind.

Zwei Aspekte mussten hierbei Berücksichtigung finden.

Da die meisten Komponenten des Intelligenten Leitkegels im deaktiviertem Zustand in einen Power-Down Modus versetzt werden, um die Energie des Akkus zu sparen, muss das GNSS-Modul bei der Aktivierung des IL eine sogenannten Kaltstart ausführen. Dieser Kaltstart führt dazu, dass das Modul bis zur ersten Positionslösung eine gewisse Zeit benötigt (Time to First Fix, TTF). Diese Zeit liegt im Bereich von ca. 30 Sekunden.

Der zweite Aspekt betrifft die zeitliche Eigenschaft der Positionsberechnung nach PPP-Verfahren, welches im IL Anwendung findet.

Anders als bei Single-Positionslösungen, die auf Pseudorange-Daten der Satellitendaten basieren, beruht die gesteigerte Genauigkeit des PPP-Algorithmus auf der Auswertung und Akkumulation der Satelliten-Phasen-Rohdaten. Dies bedeutet, dass bei der Verwendung des PPP-Algorithmus die Positionslösungen im Laufe der Zeit gegen einen Wert (Endwert) konvergieren. Somit muss für eine angestrebte Positionierungsgenauigkeit eine gewisse Einlaufzeit für den PPP-Algorithmus in Kauf genommen werden.

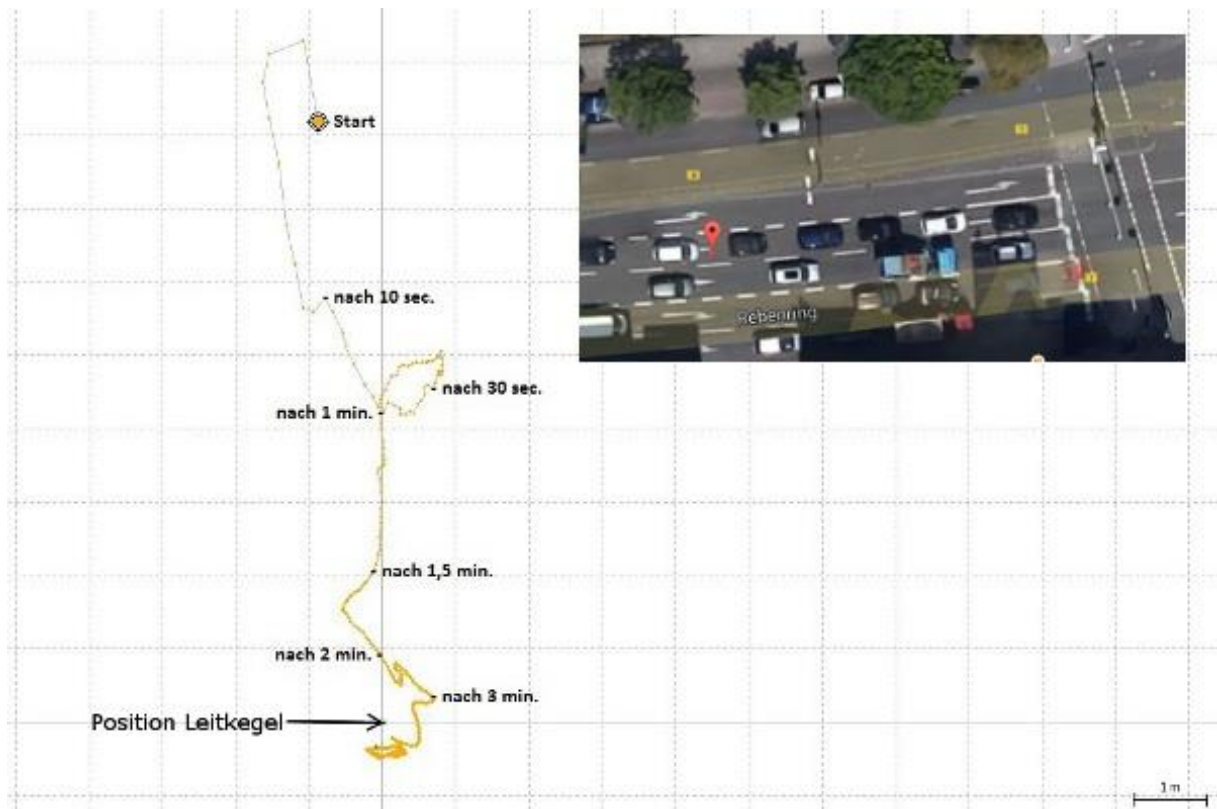


Abbildung 49: Zeitverhalten der Positionierung des IL auf dem Rebenring (westliche Zufahrt) mit dem PPP-Verfahren

Für die Darstellung des Sachverhaltes ist in Abbildung 49 wieder exemplarisch die Testmessung an der Forschungskreuzung K-047 im Testfeld Braunschweig für die Illustration der Ergebnisse herangezogen wurden. In der Grafik sind wieder, die vom IL berechneten Positionierungslösungen in der X-Y-Ebene dargestellt. Zusätzlich wurden für einige markante Punkte Zeitmarken in die Grafik eingefügt, die anzeigen, nach welcher Zeit diese Position errechnet wurde. Zu erkennen ist, dass der Startwert in dem Genauigkeitsbereich von herkömmlichen GNSS-Empfängern liegt (ca. +/-10 Meter).

Aber bereits nach 1 Minute wird eine Genauigkeit kleiner 5 Meter erreicht, die schon deutlich besser ist, als die der herkömmlichen Empfänger.

Nach spätestens 3 Minuten, im Beispiel hier sogar schon nach 2 Minuten, wird Sub-Meter Genauigkeit erreicht, die sich in den Tests als ausreichend für die fahrstreifengenaue Positionierung erwiesen hat.

### Fazit für die Ergebnisse der Positionierung

Im Forschungsvorhaben konnten besonders bei den Funktions- und Integrationstests im AIM-Prüffeld in Braunschweig, in verschiedenen Versuchen, wertvolle Informationen für die Positionierungsgenauigkeit der Intelligenen Leitkegel gewonnen werden. Hierfür wurden in verschiedenen Zufahrten der Forschungskreuzung Messungen vorgenommen und mit den

Positionierungsverfahren PPP, RTK und DGNSS ausgewertet. Auch bei schwierigen baulichen Gegebenheiten konnten stets gute bis sehr gut Positionierungsergebnisse erzielt werden.

Bei allen Testmessungen in den jeweiligen Prüf- und Testfeldern konnte in einer Zeit kleiner 3 Minuten eine Positionsgenauigkeit erreicht werden, die ein spurfeines und spurkorrektes Matching auf die TOPO der untersuchten Kreuzungen ermöglichte.

Die Positionierungsergebnisse konnten im Nachgang (Postprocessing) verfeinert und bestätigt werden. Hierzu kamen auch die weiter oben erwähnten RTK-Verfahren basierend auf kommerziellen Korrekturdaten des Referenzstationsnetzwerks SAPOS zum Einsatz.

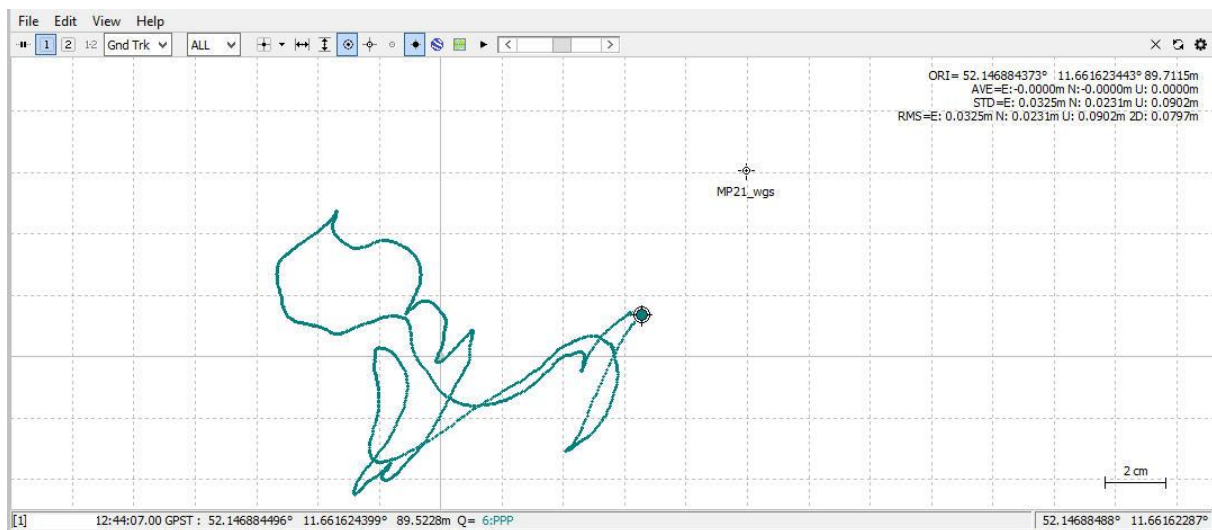


Abbildung 50: PPP-Positionslösungen des IL im Postprocessing-Verfahren im Galileo-Testfeld Magdeburg (Messpunkt 21)

In Abbildung 50 ist ein Positionierungsergebnis unter Verwendung freier Korrekturdaten vom IGS bei Verwendung des PPP-Postprocessing-Verfahren im Galileo-Testfeld Magdeburg aufgezeigt. Dieses Ergebnis zeigt sehr eindrucksvoll, was mit dem im Vorhaben entwickelten Ansatz unter günstigen aber realen Bedingungen möglich ist. Hierbei konnte die vom IL berechnete Position bis auch wenige Zentimeter der wahren Position, gegeben durch die Referenzpositionen im Testfeld, angenähert werden.

Im Vergleich hierzu ist in Abbildung 51 die gleiche Messung unter Verwendung des PPP-Verfahrens in Echtzeit mit den etwas schlechteren SBAS-Korrekturen dargestellt. Zu ersehen ist, dass auch hier nach nur kurzer Zeit Positionslösungen erreicht werden, die weniger als einen halben Meter von der wahren Position abweichen. Der hierbei erreichte Grad an Positionsgenauigkeit zeigte sich in den verschiedenen Tests stets als hinreichend gut, um mit den in Abschnitt 3.4 vorgestellten Fahrstreifen-Matching-Algorithmus eine sichere Zuordnung zum entsprechenden Fahrstreifen herstellen zu können.

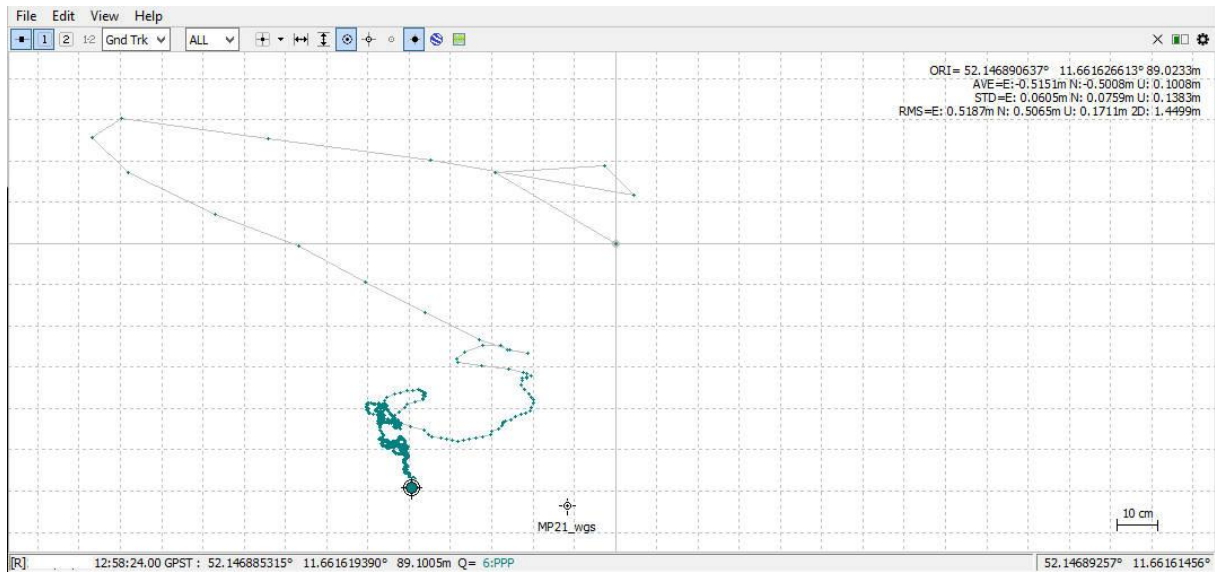


Abbildung 51: IL-Positionslösung im Realtime-PPP-Verfahren mit SBAS Korrekturen (Galileo-Testfeld Magdeburg, Messpunkt 21)

Ein weiteres, bei den Transfertests in Düsseldorf erzielt Ergebnis unter Realbedingungen, zeigt Abbildung 52. Hier wurde der IL an der Testkreuzung Oberbilker-Markt, direkt neben der Kreuzungsausfahrt Kölner Str. aufgestellt, da ein direktes Aufstellen auf dem entsprechenden Fahrstreifen zum Zeitpunkt der Tests nicht möglich war, ohne empfindlich in den Verkehrsablauf einzugreifen (siehe auch Abbildung 55). Auch bei diesen Tests zeigte sich, dass nach nur kurzer Zeit, Positionsösungen mit Sub-Meter Genauigkeit erreicht werden.

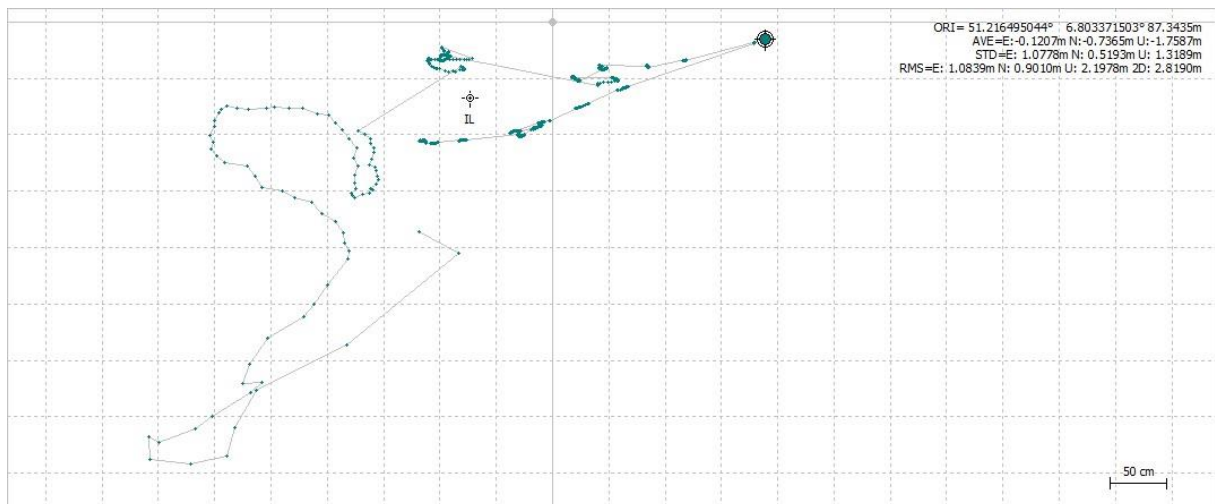


Abbildung 52: IL-Positionslösung im Realtime-PPP-Verfahren mit SBAS Korrekturen (Testkreuzung Oberbilker-Markt in Düsseldorf)

Auch die Vermessung der Störstellen bezüglich Ausdehnung und Länge ist ein wichtiges Ergebnis für die Applikation und direkt abhängig von der Ortungsgenauigkeit.



Hierbei ist die kombinierte Genauigkeit mehrerer Intelligenter Leitkegel (mind. 2) von Bedeutung, um auch die Abmessungen einer Störstelle genau genug vermessen zu können. In den Tests konnte für die untersuchten Szenarien eine Genauigkeit bezüglich der Störstellenlänge von besser als 1 Meter erreicht werden.

In den 3 Minuten vom Aufstellen des IL bzw. Aktivieren der KSE bis zur fahstreifenfeinen Verortung und Meldung an die Verkehrsteilnehmer, beruht die Schutzfunktion, wie bei herkömmlicher Sperrtechnik, nur auf einer optischen Warnung bei Sichtung durch den Fahrer.

Da allerdings auch nach kürzerer Zeit < 1Minute eine Positionslösung vom IL vorliegt, die in jedem Falle eine korrekte Zuordnung zu einer entspr. Kreuzung erlaubt, wäre es vorstellbar und sinnvoll, unmittelbar nach Aktivierung der KSE, kurzfristige eine unspezifische Gefahrenmeldung an die Verkehrsteilnehmer zu senden, in der erst einmal über eine Störstellensituation mit geänderter Spurführung im entspr. Kreuzungsbereich gewarnt wird. Somit könnte auch kurzfristiger gewarnt werden und mehr Verkehrsteilnehmer erreicht werden. Auch könnte dann die KSE ihre Verbesserte Schutzfunktion ausspielen, da ja zum Zeitpunkt des Aufstellens der Leitkegel das entsprechende Servicepersonal besonders gefährdet ist und ein aufmerksamerer, ggf. langsamerer fahrender Fahrzeugführer, eine enormen Sicherheitszugewinn für das Servicepersonal bedeuten würde.

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass während der Tests auch bei nicht optimalen Empfangsbedingungen an den allermeisten getesteten Positionen Submeter-Genauigkeit erreicht werden kann. Auch bei schlechten Empfangsbedingungen kann mittels RTK/PPP-Processing unter Einbeziehung verschiedener Korrekturdaten eine Performance erreicht werden, die der von Low-Cost- oder Handy-Empfängern überlegen ist und für die im Vorhaben gestellte Positionierungsaufgabe ausreichend ist.

### **3.9 Test- und Prüffelder der Applikation SK-35**

Die Applikation SK-35 wurde in verschiedenen Test- und Prüffeldern evaluiert und getestet. Das AIM-Prüffeld Braunschweig war das Haupttestfeld für die Integrations- und Funktionstests der Kooperativen Schutzeinrichtung und der anderen Applikation der Smarten Kreuzung. Getestet wurde die Kooperative Schutzeinrichtung hauptsächlich an der Forschungskreuzung K-047 (Rebenring/Hagenring/Brucknerstr). Die Kreuzung K-047 ist mit alle benötigten Infrastrukturkomponenten ausgerüstet und stellt somit eine ideale Test- und Forschungsplattform für die Erforschung und Erprobung der Kooperativen Schutzeinrichtung dar.

Darüber hinaus erlaubte die Baustellensituation an der Testkreuzung K-047 zum Zeitpunkt der Tests, die Applikation in einer realen Störsituation, in diesem Fall eine Baustelle, zu testen. Somit war es während des Tests möglich, in verschiedenen Zufahrten der Testkreuzung, direkt im Straßenraum zu messen. Dies erbrachte wertvolle Erkenntnisse und

Ergebnisse bezüglich der so wichtigen Positionierungs-genauigkeit unter realen Bedingungen (siehe auch Abbildung 53 und Abbildung 54).

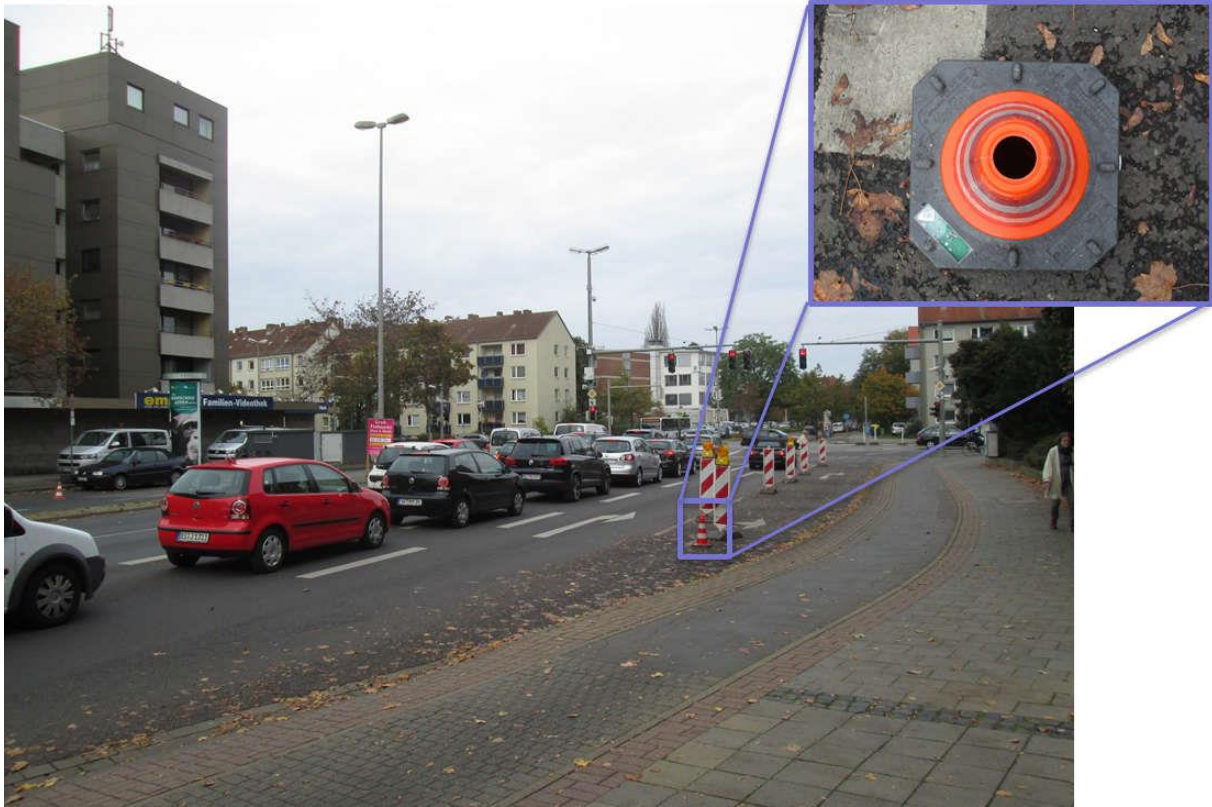


Abbildung 53: Einsatz des Intelligenten Leitkegels während der Funktionstests im Prüffeld Braunschweig, Zufahrt zur Forschungskreuzung K047 unter Ausnutzung einer aktuellen Baustellensituation



Abbildung 54: Einsatz des Intelligenten Leitkegels während der Integrationstests im Prüffeld Braunschweig, Zufahrt zur Forschungskreuzung K047 unter Ausnutzung einer aktuellen Baustellensituation

Ein wichtiges Forschungsziel in UR:BAN war die Übertragbarkeit der entwickelten Applikationen.

Hierfür wurden wesentliche und für die Funktion der Applikationen benötigte Infrastrukturkomponenten in das Testfeld Düsseldorf an die Testkreuzung Oberbilker Markt übertragen und in Betrieb gesetzt. Auch an dieser Testkreuzung wurden für die Applikation SK-35 umfangreiche Tests durchgeführt, um die im Testfeld Braunschweig erzielten positiven Ergebnisse bei der Übertragung in anderen Testfelder/Kommunen zu verifizieren (siehe auch Abbildung 55).



Abbildung 55: erfolgreicher Einsatz der KSE und des IL bei den Transfertests im Testfeld Düsseldorf. Positionierung zweier IL am Oberbilker Markt, Kreuzungsausfahrt Kölner Str., Richtung Norden

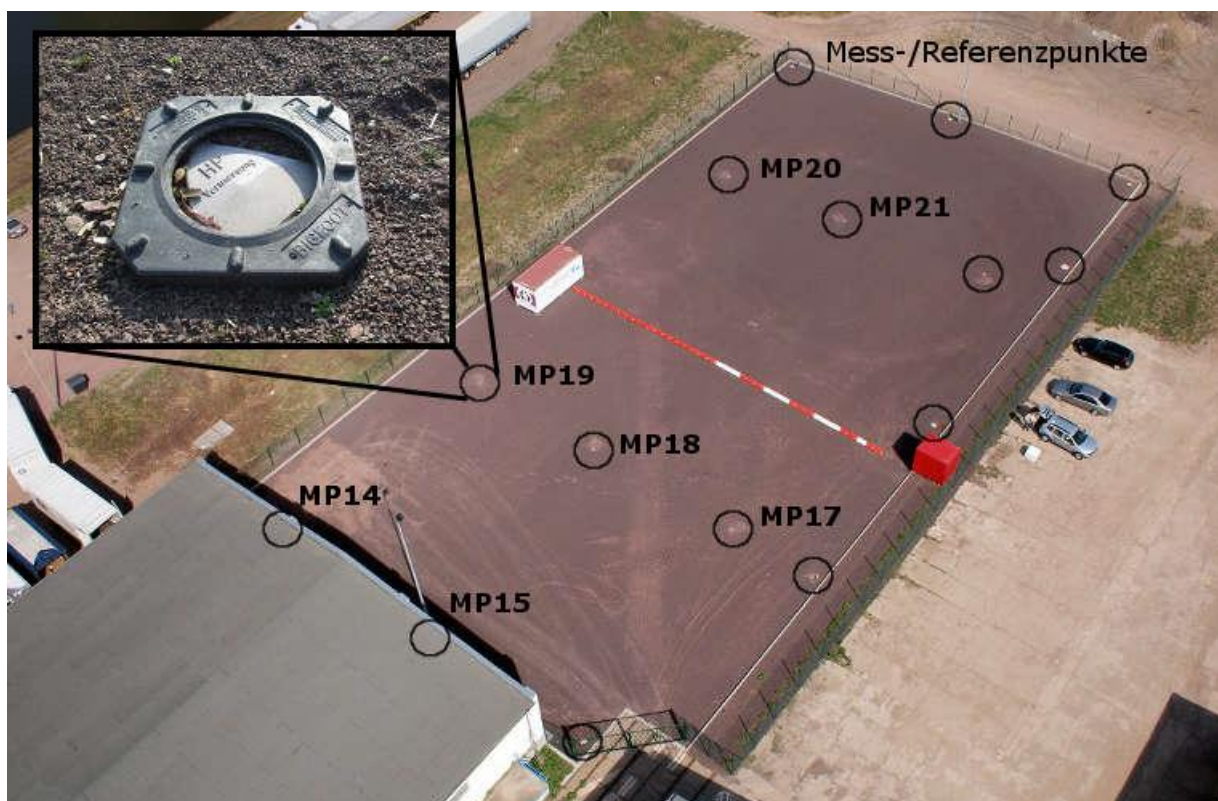


Abbildung 56: Freifläche des Galileo Testfelds Magdeburg mit ausgewählten Messpunkten (MP) und Prototyp des IL (ohne Kegelkonus) auf dem Messpunkt MP19

Neben den beiden Test- und Prüffeldern Düsseldorf und Braunschweig, in denen die Applikation SK-35 in ihrer Gesamtfunktionalität und besonders im Zusammenspiel mit den

anderen Applikationen der Smarten Kreuzung getestet wurde, fanden sehr umfangreiche Tests und Versuche im Galileo-Testfeld Magdeburg statt. Als ein Testfeld für Logistik, Ortung, Navigation und Verkehr bietet es ideale Möglichkeiten und Voraussetzungen für die Erforschung von Anwendungen, wie die hier vorgestellte Applikation. Besonders die Freifläche mit den hochgenau eingemessenen Referenzpunkten (siehe auch Abbildung 56) waren ein unverzichtbares Hilfsmittel bei der Erforschung und Erprobung der verschiedenen GNSS-Module und Positionierungsverfahren der Kooperativen Schutzeinrichtung.

Darüber hinaus standen im Galileo-Testfeld verschiedene präzise, Mehrfrequenz-GNSS-Empfänger zur Verfügung, die als Referenzmesssystem für die Bewertung der Positionierungsgenauigkeit auch in den anderen Testfeldern Verwendung fanden.

### **3.10 Zusammenfassende Ergebnisse, Evaluierung und Bewertung der KSE (SK-35)**

Die Applikation dient der Informierung und Warnung aller beteiligten Verkehrsteilnehmer über plötzlich auftretende Störungen im Kreuzungsumfeld wie bspw. Unfälle, Behinderungen durch Fahrzeuge und Gegenstände, Havarien, ungeplante Baustellen o. ä. zum Zwecke der Verbesserung der kollektiven Verkehrssicherheit. Weiterhin fungiert die Kooperative Schutzeinrichtung als Datenquelle für andere Applikationen der Smarten Kreuzung und trägt somit auch zur Verbesserung der Informations- und Datenlage bei.

Im Forschungsvorhaben wurde die Applikation Kooperative Schutzeinrichtung in den Arbeitspaketen AP5000 und AP7000 evaluiert sowie technisch und verkehrlich bewertet.

#### **Ergebnisse der technischen Bewertung**

Die technische Bewertung der Applikation SK-35 „Kooperative Schutzeinrichtung“ wurde auf der Grundlage der Funktions- und Integrationstests im Prüffeld Braunschweig sowie den Transfertests im Testfeld Düsseldorf vorgenommen.

Für die technische Bewertung wurden im Wesentlichen die folgenden individuellen Testkriterien herangezogen und ausgewertet:

- Ortungsgenauigkeit bzw. Verlässlichkeit der Positionslösungen,
- Verortungszeit,
- UMTS-Kommunikation (Backend-Kommunikation),
- 802.11p-Kommunikation und
- Handling und Betriebssicherheit der Hard- und Software des Intelligenten Leitkegels und der Konfigurations-Applikation

### **Ortungsgenauigkeit und Verortungszeit**

Für die Darstellung der Ergebnisse bezüglich Ortungsgenauigkeit und Verortungszeit sei hier auf Abschnitt 3.8 (Ausgewählte Positionierungsergebnisse und Fazit für die Ergebnisse der Positionierung) verwiesen.

### **KSE-Kommunikation (UMTS-Backend-Kommunikation und 802.11p Car2X-Kommunikation)**

Für die technische Bewertung der Applikation SK-35 hinsichtlich Kommunikation wurde nur die UMTS-Kommunikation und die Kommunikation mittels 11p-Kurzstreckenfunkt herangezogen. Aspekte wie die Internetbasierte Kommunikation zwischen den beteiligten Servern und dem Backbone des Mobilfunknetzes wurden nicht untersucht, da sie in Punkto Datenrate, Verfügbarkeit, und Latenz nicht so stark ins Gewicht fallen, im Vergleich zur UMTS-Funkkommunikation. Weiterhin wurden keine Untersuchungen bezüglich Verfügbarkeit der beteiligten Server vorgenommen. Auch der Einfluss der Verschlüsselung durch die verwendete VPN-Lösung, blieb im Hinblick auf Datenrate und Latenz unberücksichtigt.

In dem in Abschnitt 3.2 vorgestelltem Kommunikationsschema der KSE ist zu ersehen, dass sowohl für die Kommunikation zwischen Intelligentem Leitkegel und Leitkegel-Server, als auch zwischen Leitkegel-Server und RSU, die Mobilfunkkommunikation nach dem UMTS-Standard Anwendung findet. Der Einfluss der UMTS-Kommunikation auf Datenrate, Verfügbarkeit und Latenz ist in dem hier aufgezeigten Kommunikationsschema am größten, besonders, da die sie zweimalig zum Einsatz kommt.

Aus diesem Grund wurde die UMTS-Kommunikation im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Gesamtfunktionalität der Applikation für eine technische Bewertung herangezogen.

Während der Tests konnte in allen Prüf- und Testfeldern eine ausgezeichnete UMTS-Verbindungsqualität protokolliert werden. Dies betrifft sowohl die Verbindung zwischen IL und Leitkegelserver als auch die Verbindung zwischen Leitkegelserver und RSU. Zu keinem Zeitpunkt gab es unerwartete Verbindungsabbrüche. Auch der Zeitverzug (Latenz) bei der Datenübertragung lag in allen Fällen unter 2 Sekunden und somit im akzeptablen und erwarteten Bereich. Im Mittel lag der Zeitverzug bei 300 ms, was einen ausgezeichneten Wert darstellt und für die korrekte Funktion der Anwendung mehr als ausreichend ist.

Weiterhin konnte protokolliert werden, dass alle übertragenen Datenpakete inhaltlich korrekt übertragen wurden und keine Datenpaketwiederholungen nötig wurden.

Zu prüfen bleibt noch, wie sich die UMTS-Qualität im Worst-Case-Fall z.B. Auslastung der Funkzelle (über Jahreswechsel, ...) darstellt und ob sich hierbei kritische Zustände ergeben.

Weiterhin wurden keine unterschiedlichen Netzbetreiber getestet. Hier könnten sich in Bezug auf Netzabdeckung, Netzverfügbarkeit, Datenraten und Latenzzeiten Unterschiede ergeben.

Für die Untersuchung und Bewertung 802.11p Car2x Kommunikation wurde in den Versuchsträger T5-Multivan des ifak eine entsprechende CCU eingerüstet. Somit wurden auch umfangreiche und realitätsnahe Fahrversuche möglich. Für die Auswertung der inhaltlichen Korrektheit der Datenpaket, sowie des Zeitverhaltens, wurde auf allen beteiligten Car2X-Geräten (RSU/CCU, ifak-Versuchsträger CCU) Logdateien generiert, die im Anschluss eine Offline-Analyse ermöglichten. Für die Analyse kamen verschiedene Werkzeuge wie das Unix/Linux- basierte tcpdump und das vom ifak im TP KI entwickelte 11p-Testsystem zum Einsatz (siehe auch Abschnitt 4.1).

Alle während der Tests von der KSE generierten DEN-Nachrichten wurden durch die RSU korrekt versendet und konnten durch die verschiedenen mobilen Versuchsträger empfangen werden.

Auch der Zeitverzug (Delay) von der Erfassung der Störung/Beeinträchtigung durch den IL bis zum Empfang der entsprechenden DENM im Fahrzeug bzw. 11p-Sniffer war in allen Testfällen in einem akzeptablen Bereich von ca.1 Sekunden.

Mit dem ifak-Versuchsträger konnte in allen untersuchten Szenarien ein rechtzeitiger Empfang der KSE-DENM protokolliert werden.

Mit der C2X-Einheit im Versuchsträger T5-Multivan konnten mind. 150 Meter vor dem Beginn der Störstelle die entsprechende KSE-DENM empfangen, dekodiert und ausgewertet werden, was wiederum ein genügend großes Zeitfenster für eine angemessene Reaktion (verlangsamte Fahrt, rechtzeitiger Spurwechsel, ...) einräumte.

Das Sendeintervall für die DENM-Nachrichten, welches auf der RSU mit 1 Sekunde eingestellt wurde, hat sich bei den verschiedenen Tests als praktikabel erwiesen. Dieser Wert stellt einen sehr guten Kompromiss zwischen genügend großer Updaterate und Funkkanalbelegung dar.

### **Handling und Betriebssicherheit der Hard- und Software des Intelligenten Leitkegels und der Konfigurations-Applikation**

Der Intelligente Leitkegel als Front-End-Gerät und Datenlieferant der Kooperativen Schutzeinrichtung ist die Komponente, mit der die Anwender (Service- und Rettungskräfte) arbeiten müssen. Somit stellt das Handling bzw. die „Benutzbarkeit“ des IL ein wichtiges Kriterium für die technische Bewertung dar. Das „Look an Feel“ und die Ausfallsicherheit sind hierbei entscheidende Aspekte.

Beide Prototypen des Intelligenten Leitkegels haben während der Tests und in der Demonstrationsphase, auch unter widrigsten Bedingungen sicher funktioniert. Getestet wurde unter realen Bedingungen (Regen, Schnee, geringe Temperaturen, erhöhte Temperaturen). Auch weitere spezifizierte Einsatzbedingungen, wie z.B. Schockresistenz, konnten bei den zahlreichen Tests positiv bestätigt werden.

Auch die Softwarekomponenten des IL, angefangen mit dem Betriebssystem, über den Positionierungsalgorithmus, bis zu Komponenten für die Sensorauswertung und Kommunikation, haben sicher funktioniert. Die Konfiguration der IL mit der im Vorhaben entwickelten Konfigurations-Applikation wurde im Feld mit verschiedenen Geräten erfolgreich getestet.

Auch die angestrebte minimale Akkulaufzeit von > 24 Stunden konnte unter realen Testbedingungen bestätigt werden.

### **Fazit der technischen Bewertung**

Die für die Applikation SK-35 „Kooperative Schutzeinrichtung – Intelligenter Leitkegel“ angestrebte Funktionalität konnte in den umfangreichen Funktions- und Integrationstest im Prüffeld Braunschweig sicher nachgewiesen werden. Auch der Transfer der KSE-Technologie in das Demonstrationsfeld Düsseldorf hat hervorragend funktioniert und konnte nicht zuletzt in der erfolgreichen Abschlussdemonstration gezeigt werden.

Die Hardware des/der IL hat auch unter widrigen Umständen in realen Einsatz-szenarien sicher funktioniert.

Die gesamte Kommunikationskette mit allen bereitgestellten und benötigten Schnittstellen, sowie den beteiligten Softwarekomponenten, konnte erfolgreich getestet werden, bis hin zur Versendung der KSE-DENM durch die RSU und dem Empfang, Dekodierung und Anzeige im Fzg.

Die GNSS-Verortung des Intelligenten Leitkegels erbrachte gute bis sehr gute Ergebnisse, auch unter schwierigen Bedingungen (fahrstreifenfeine Verortung bzw. Matching auf Fahrspur hat funktioniert)

Die Dekodierung und Verarbeitung der KSE-DENM durch die Fzg., auch die der Partner, hat in verschiedenen Szenarien sicher funktioniert.

### **Ergebnisse der Untersuchung der verkehrlichen Wirkung**

Obwohl die entwickelte KSE-Applikationen keine direkt verkehrliche Wirkung hat, wurde auch eine Bewertung hinsichtlich der verkehrlichen Wirkung vorgenommen, da für die Kooperative Schutzeinrichtung eine indirekte verkehrliche Wirkung angenommen und nachgewiesen werden konnte.

Da in den Prüf- und Testfeld ein Eingriff in den Verkehrsablauf nicht oder nur ein-geschränkt möglich war und auch reale Störfälle kaum vorzuplanen sind, war die direkte Messung der Wirkungen im realen Verkehr auf Grund des enormen Aufwandes für die Applikation SK-35 nicht möglich bzw. nicht praktikabel.

Somit wurde die Bewertung hinsichtlich der verkehrlichen Wirkung durch umfangreiche simulative Untersuchungen vorgenommen.



Für die Untersuchung der verkehrlichen Wirkung wurden drei Wirkungsschwerpunkte für die KSE identifiziert. Die wichtigste verkehrliche Wirkung der KSE betrifft die Verkehrssicherheit. Die Erhöhung der Verkehrssicherheit sowohl für die Verkehrsteilnehmer als auch für die Service- und Einsatzkräfte als Anwender der KSE, stelle die Hauptmotivation im Vorhaben dar. Umweltauswirkungen und Effizienzwirkung sind weitere Wirkungsschwerpunkte der hier vorgestellten Applikation.

Für die Untersuchung der Sicherheits- und Umweltauswirkungen wurden Mikrosimulationen mit verschiedenen VISSIM-Netzen durchgeführt. Hierbei wurden verschiedenen Zufahrtstypen modelliert und die Auswirkung der KSE ausschließlich in den Zufahrtsbereichen analysiert. Für die Applikation SK-35 wurden Verkehrsbelastungen des Tagesnormalverkehrs (11-12 Uhr) und für die Nachmittagsspitzenstunde (16-17 Uhr) betrachtet und ausgewertet. Neben verschiedenen Annahmen, die die Fahrerreaktion beschreiben, wurde das Fahrstreifenwechselverhalten durch die Modellierung verschiedene Fahrstreifenwechselbereiche (siehe auch Abbildung 57) und eine Verteilung des Spurwechselverhaltens berücksichtigt. Der erste Bereich (ca. 150 m vor der Sperrung), in dem nur ausgestattete Fahrzeuge über die Sperrung informiert sein können (orange), ein zweiter Bereich (ca. 50 m vor der Fahrstreifen-sperrung/Störstelle), in dem sowohl ausgestattete als auch nicht ausgestattete Fahrzeuge den Fahrstreifenwechsel vornehmen (blau) und ein dritter Bereich (direkt vor der Sperrung - grün).

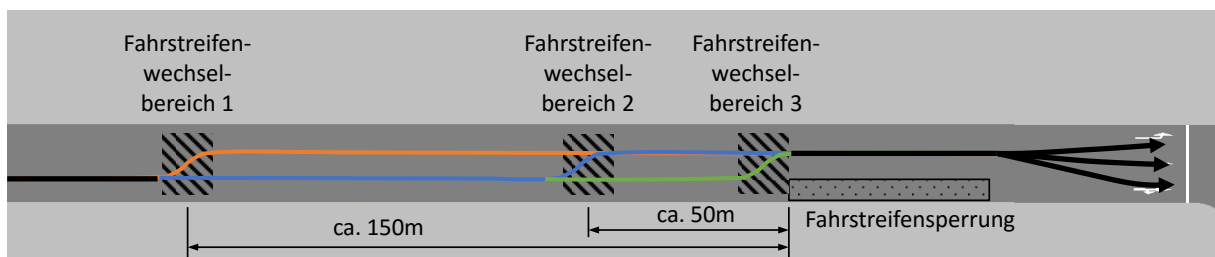


Abbildung 57: Modellierung der Fahrstreifenwechselbereiche in der Störstellenzufahrt

Für eine adäquate Untersuchung der Effizienzwirkung wurde die Auswirkung der KSE-Applikation auf Netzebene mit einbezogen, indem in einer separaten Simulation Routing- und Mikrorouting-Effekte mit betrachtet wurden.

### Verkehrssicherheitswirkung

Die Auswirkungen der KSE auf die Sicherheit wurden anhand der Änderungen

der relevanten Kenngrößen (Nettozeitlücke (Time Headway) – THW und Time-toCollision - TTC), sowie der mittleren Geschwindigkeit im Störstellenbereich untersucht. Die Nutzung von Ersatzkenngrößen ist notwendig, da eine Abbildung von Konflikten (in diesem Fall

Auffahrunfällen) in der durchgeführten mikroskopischen Verkehrssimulation nicht möglich ist.

Insgesamt zeigten sich überwiegend positive Tendenzen bei der Betrachtung der Sicherheitskenngrößen. Bei Knotenpunktzufahrten mit separatem Linksabbiegefahrstreifen und Mischfahrstreifen für den Geradeaus- und Rechtsabbiegeverkehr, zeigen sich hierbei vor allem im Tagesnormalverkehr bei Nutzung der SK-35-Applikation auf den linken Fahrstreifen signifikante Unterschiede im Abstandsverhalten. Es kommt zur Verbesserung der Verteilung der Nettozeitlücke erkennbar durch Vergrößerung der mittleren Nettozeitlücke und der minimalen Nettozeitlücke.

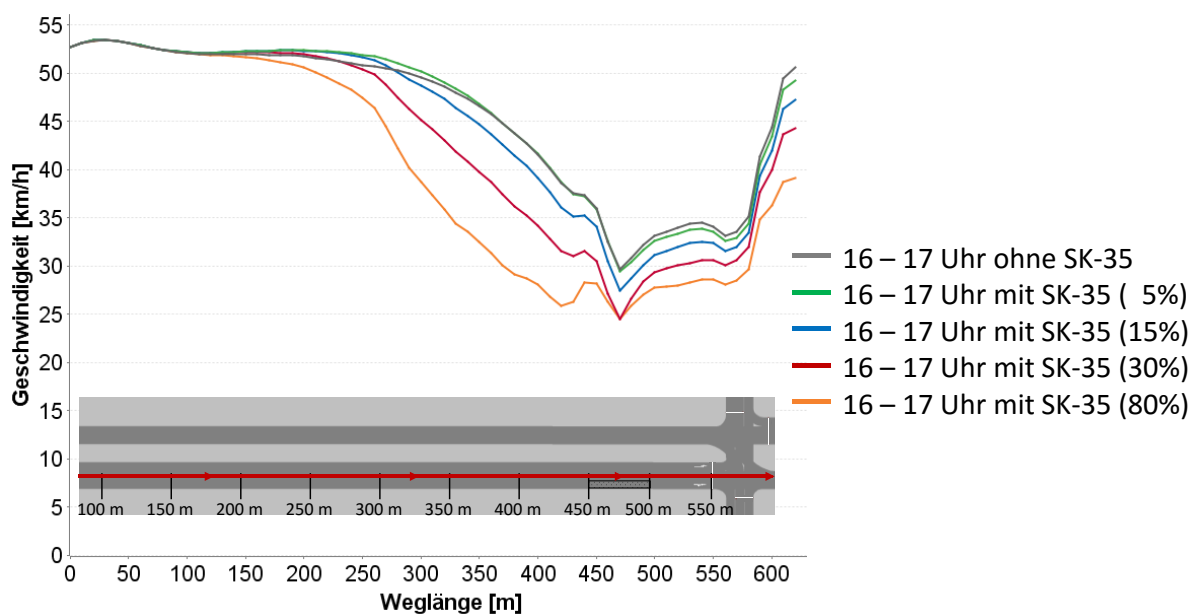


Abbildung 58: Einfluss der SK-35-Applikation auf den Geschwindigkeitsverlauf (lokale Geschwindigkeit) für die Annäherung an den Knotenpunkt mit Zufahrtstyp 5 bei hoher Verkehrsbelastung (16-17 Uhr) und Sperrung des rechten Fahrstreifens

In Abbildung 58 ist exemplarisch der Geschwindigkeitsverlauf der Fahrzeuge bei direkter Annäherung an den Störstellenbereich für einen ausgesuchten Zufahrtstyp bei hoher Verkehrsbelastung dargestellt. Obwohl die Abnahme der Geschwindigkeit lokal zu einer Verschlechterung der Verkehrseffizienz (Reisezeit, Geschwindigkeit) führt, kann das hier dargestellte Ergebnis als äußerst positiv in Bezug auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit gewertet werden. Zu ersehen ist sehr deutlich, wie bei erhöhten Ausstattungsraten die gefahrene Geschwindigkeit in der Störstelle und in der Zufahrt auf die Störstelle verringert wird. Dies stellt einen klaren Sicherheitszugewinn sowohl für die Fahrzeuge, als auch in besonderem Maße für die Service- und Einsatzkräfte in der Störstelle selbst dar.

## Umweltauswirkungen

In der Analyse der Umweltkenngößen wurden alle Fahrzeuge berücksichtigt, die den Knotenpunkt aus der betrachteten Zufahrt befahren haben. Neben dem mittleren Kraftstoffverbrauch wurden die Emissionen von Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC), Stickstoffoxiden (NOX) und Feinstaub (PM) betrachtet.

Mit zunehmender Ausstattungsrate der Fahrzeuge mit der SK-35-Applikation ist eine Reduzierung des mittleren Kraftstoffverbrauches in allen simulierten Zufahrtstypen festzustellen. Szenarien mit hoher Ausstattungsrate (80 %) zeigen dabei ein Einsparpotential von ca. 15 %.

Für den Ausstoß der einzelnen Schadstoffemissionen können ebenfalls sinkende Tendenzen festgestellt werden. Vor allem die Emission von CO und NOX kann in allen betrachteten Zufahrtstypen signifikant gesenkt werden. Dies bezieht sich vor allem auf Szenarien mit hohen Ausstattungsraten (30 % und 80 %).

Die Emissionsbelastungen durch Kohlenwasserstoffe (HC) werden durch die SK-35-Applikation tendenziell auch positiv beeinflusst, jedoch lässt sich hier nur bei 80 %-Ausstattungsrate eine Signifikanz der Änderung feststellen. Ähnliches gilt für den Einfluss von SK-35 auf die Feinstaubbelastung. Hier zeigt sich für hohe Ausstattungsraten (30 % und 80 %) eine signifikante Senkung der Belastungswerte für alle untersuchten Zufahrtstypen.

## Effizienzwirkung

Der Untersuchung der Effizienzwirkung der KSE-Applikation liegt die Annahme zu Grunde, dass durch rechtzeitige Informierung der Verkehrsteilnehmer bezüglich der mit der KSE erfassten Verkehrsstörungen, ein angepasstes Routing bzw. Mikro-Routing möglich wird, was im Störfall zu einer strategischen Verkehrsverlagerung und somit zu einer Steigerung der Effizienz führen kann.

Mithilfe des Simulationsprogramms SUMO (Simulation of Urban Mobility) [32] wurde die verkehrliche Wirkung der KSE-Applikation hinsichtlich der Verkehrseffizienz simuliert und anschließend analysiert.

Als Bewertungskriterien wurden die Reisezeit, die Geschwindigkeit und die Stand- bzw. Haltezeit für drei Szenarien untersucht.

Bei der Untersuchung wurden folgende Annahmen geprüft:

- Werden Fahrzeuge rechtzeitig über eine Spersperrung informiert und können so auf eine (längere) Alternativroute ausweichen, so wirken sich Information und Umleitung dennoch positiv auf die Reisezeit aller betrachteten Verkehrsteilnehmer aus.
- Werden Fahrzeuge rechtzeitig über eine Spersperrung informiert und können sich lediglich früher auf die freie Spur einordnen, so wirkt sich dies dennoch positiv auf die Reisezeit aller betrachteten Verkehrsteilnehmer aus.

Das hierfür erzeugte vereinfachte Verkehrsnetz ist in Abbildung 59 dargestellt. Es besitzt eine zuführende Straße, die sich auf zwei Routen aufteilt sowie eine wegführende Straße, bei der sich beide Routen wieder vereinigen. Sowohl die zuführende als auch die wegführende Straße sind vierspurig. Alle weiteren Straßen sind zweispurig angelegt.

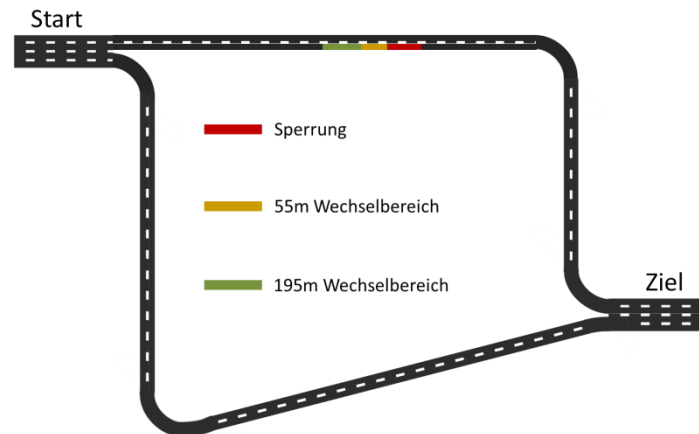


Abbildung 59: Grundlegender Aufbau des Verkehrsnetzes die SUMO-Simulation der KSE

Die beiden Routen unterscheiden sich durch unterschiedliche Gesamtlängen. Auf der kürzeren der beiden Routen wurde eine Sperrung der rechten Spur über 80 m simuliert. Durch Überfahren virtueller Detektoren wird die Sperr-Information an ein Fahrzeug gegeben. Es versucht dann automatisch, auf die freie Spur zu wechseln. Dafür wird ggf. die Geschwindigkeit angepasst. Ist dennoch kein Fahrstreifenwechsel möglich, so fährt ein Fahrzeug bis zur Sperrung und wartet dort, bis links eine Lücke frei wird.

Die längere Route wurde als Alternativroute modelliert. Die Richtgeschwindigkeit beträgt 50 km/h, was städtischem Verkehr entspricht. Virtuelle Detektoren und das Traffic Control Interface von SUMO simulieren die vom Leitkegel übermittelten Informationen und entsprechenden Reaktionen.

Betrachtet werden drei Szenarien mit acht verschiedenen Ankunftsströmen, von 1600 bis 2300 Fahrzeugen pro Stunde. Verglichen werden Reisezeit, Geschwindigkeit und Stand- bzw. Haltezeit.

### Szenarien

Das erste Szenario stellt die Vergleichsgrundlage ohne KSE-Informationen dar. Hier fahren alle Fahrzeuge auf der kurzen Route und versuchen erst in einem Abstand von 55 m vor der Sperrung, sich auf den linken Fahrstreifen einzuordnen. Dadurch wird eine Ausstattungsrate von 0 % nachgestellt. Als Ausstattungsrate ist auch hier wieder der Anteil an Fahrzeugen zu verstehen, die mit entspr. Funktechnik in der Lage waren, die KSE-Informationen rechtzeitig zu empfangen.

Im zweiten Szenario wird die Ausstattungsrate auf 5 %, 15 %, 30 % und 80 % erhöht. Diese Fahrzeuge erhalten bereits vor Erreichen der Routen-Teilung die Information über die Sperrung und die Empfehlung, die Alternativroute zu fahren. In der Simulationen befolgen alle diesen Hinweis. Alle weiterhin auf der kurzen Route fahrenden Fahrzeuge versuchen sich, wie beim ersten Szenario, erst 55 m vor der Sperrung einzuordnen.

Im dritten Szenario wurden wieder alle Fahrzeuge auf die kurze Route geschickt. Es erhalten alle Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen bereits 195 m vor der Sperrung die Information und versuchen sich sofort links einzuordnen.

Als Ergebnis soll hier exemplarische die Änderung der Reisezeit tabellarisch aufgezeigt werden. Eine eingehende Betrachtung der erzielten Ergebnisse kann im Meilensteinbericht 4 eingesehen werden.

Tabelle 3: Änderung der Reisezeit mit KSE-Informationen (zweite Szenario) für unterschiedliche Ausstattungsraten

		Reisezeit in s				
		Vergleich	5%	15%	30%	80%
1600	Wert	1176,32	962,77	590,69	362,19	368,99
	Δ in %		-18,15	-49,78	-69,21	-68,63
1700	Wert	1428,82	646,54	367,68	363,08	368,9
	Δ in %		-54,75	-74,27	-74,59	-74,18
1800	Wert	1544,04	826,25	941,01	382,22	369,25
	Δ in %		-46,49	-39,06	-75,25	-76,09
1900	Wert	1241,86	1480,17	604,01	501,78	369,19
	Δ in %		19,19	-51,36	-59,59	-70,27
2000	Wert	1725,56	1606,95	1287,29	571,53	369,47
	Δ in %		-6,87	-25,4	-66,88	-78,59
2100	Wert	1425,98	1597,55	1371,37	375,62	369,44
	Δ in %		12,03	-3,83	-73,66	-74,09
2200	Wert	1473,91	1716,45	1102,1	877,71	369,68
	Δ in %		16,46	-25,23	-40,45	-74,92
2300	Wert	1510,57	1753,1	1507,87	936,52	369,87
	Δ in %		16,06	-0,18	-38	-75,51

**Fazit:**

Die Tabelle 3 stellt die Werte und Veränderung der Reisezeit für die einzelnen Ausstattungsraten dar. Dabei zeigt sich, dass eine höhere Anzahl an umgeleiteten Fahrzeugen die Reisezeit im Vergleich zum ersten Szenario („Vergleich“ bzw. 0 %) generell verbessert. Einzelne Verschlechterungen sind bei 5 % Ausstattung zu verzeichnen. Auch

schwanken die Werte für den Vergleichsfall. So sinkt die Reisezeit bei 1900 Fahrzeugen pro Stunde deutlich und steigt bei 2000 dafür umso stärker. Diese Sprünge sind auch für die Geschwindigkeit und die Standzeit zu beobachten. Ein Grund dafür ist der Spurwechsel, welcher unterschiedlich gut funktioniert. Für verschiedene Eingangsströme ergeben sich unterschiedliche Lücken, in die die Fahrzeuge wechseln können. Dadurch kann es zu längeren Staus bzw. einem stetigen Anfahren und Abbremsen kommen. Ebenfalls kann so ein guter Abfluss der Fahrzeuge begünstigt werden, wenn die Lücken passend auftreten. Die Verschlechterungen im Bereich der 5 % sind auf dieselben Gründe wie die Sprünge beim Vergleichsfall zurückzuführen. Jedoch kommt hinzu, dass Fahrzeuge auf der zuführenden Straße den Fahrstreifen wechseln müssen, um auf die alternative Route abbiegen zu können. Dadurch müssen sie dort bereits abbremsen und Lücken suchen. Zusätzlich stauen sich deswegen auch weiterhin Fahrzeuge auf, die auf der kurzen Route bleiben wollen. Ab 15 % wird dieser Effekt durch das flüssigere fahren auf beiden Routen ausgeglichen. Bei 30 % und 80 % sind die besten Ergebnisse zu beobachten. Dabei erscheint eine Ausstattungsrate von 30 % bei kleineren Verkehrsdichten positiver als von 80 %, da für die Alternativroute mehr Zeit benötigt wird und bei beiden Wahrscheinlichkeiten auf der kürzeren Strecke bereits eine freie Fahrt möglich ist.

Auch bei der Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit zeigt sich eine generelle Verbesserung durch den Einsatz der KSE und bei höheren Fahrzeug-Ausstattungsrate mit 802.11p Funktechnik. Dies liegt daran, dass die Fahrzeuge auf der Alternativroute ihre Geschwindigkeit beibehalten können. Auf der kurzen Route müssen sie spätestens vor der Sperrung abbremsen, um die Spur zu wechseln, da meistens nicht direkt eine passende Lücke vorhanden ist. Auch ein Halt vor der Sperrung kann auftreten. Zusätzlich sorgt die Entlastung dafür, dass weniger Fahrzeuge die kurze Route fahren und somit Stau vermieden wird.

Als letztes Kriterium wurde die Standzeit betrachtet. Hierbei zeigt sich, dass durch das Umleiten eine Verringerung dieser Zeit zu beobachten ist. Während es durch den Stau auf der kürzeren Route zu einer höheren Standzeit kommt, kann auf der alternativen Route durchgängig gefahren werden. Dies ist der Grund dafür, dass mit höherer Ausstattungsrate die Standzeit sinkt, da der Anteil umgeleiteter Fahrzeuge steigt.

### **3.11 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

#### **iCone Traffic Sensors for Work Zone Operations**

Die Firma „iCone Products LLC“ mit Sitz in den USA, entwickelte und betreibt mit dem iCone ein Gerät mit Eigenschaften und Anwendungszielen, die sich zum Teil mit denen, der im Forschungsvorhaben entwickelten Kooperativen Schutz Einrichtung (KSE), überschneiden.

So soll unter anderem die Sicherheit in Baustellenbereichen durch wiederverwendbare, transportable Verkehrs-Monitoring-Geräte, wie dem iCone, verbessert werden.

Der iCone ist ein Gerät, das Verkehrsinformationen in Echtzeit über das Internet an eine zentrale Webseite sendet, von wo aus sie für verschiedenen Nutzer und Nutzergruppen verfügbar gemacht werden. Nutzer sind hier im Wesentlichen Notfallpersonal und Einsatzkräfte, LKW-Flotten-Management, Medienanstalten aber auch GPS/Navi-Dienste wie Garmin.



Abbildung 60: iCone Verkehrssensor für Baustellenoperationen und Verkehrs-Monitoring aus [33]

Der iCone Verkehrssensor ist aus einem „Straßenbau-Fass“ aufgebaut, welches im inneren mit einem Computermodul, einer Platine, GPS-Gerät, Radarsensor und Kommunikationsmodul ausgestattet ist. Straßenbau-Fässer, in den USA offiziell als „Trommeln“ bekannt, sind Verkehrskontrollvorrichtungen die dazu verwendet werden, Kraftfahrzeugverkehr durch Baustellen zu kanalisieren oder in der Nähe der Fahrbahn, Autofahrer vor Bautätigkeiten zu warnen.

Die wichtigsten „iCone traffic beacon“ Eigenschaften im Überblick (aus [33] und [34]):

- Einfache Bedienung – Auf der Straße absetzen und einen Schalter umlegen für die Aktivierung
- Autonom – Powermanagement und Platinendesign resultieren in mehrwöchigen Betrieb ohne Nachladen
- Universelle Abdeckung – Ein spezielle Iridium Stelliten-Modem gewährleistet einen Abdeckung auf allen Straßen in Nordamerika
- Genaue Positionierung – GPS identifiziert den genauen Fahrstreifen, der gesperrt ist (die Genauigkeit basiert hierbei auf der Verwendung von SBAS-Korrekturdaten des WAAS-Systems und liegt etwa bei  $\pm 1 - 3$  Metern, WAAS (Wide Area Augmentation System) ist das nordamerikanische Pendant zum europäischen EGNOS-System – siehe hierzu auch Abschnitt 3.8)
- Detektion der Verkehrsgeschwindigkeit – mittlere Geschwindigkeiten werden übertragen, um Verkehrsstatus zu vermessen
- Robuste Konstruktion, Wasserdicht und Schockresistent
- einfaches Leasingmodell deckt alle Kosten für den Betrieb - Kommunikationskosten und die Kosten für die Server- und Web-basierte Informationsverbreitung sind inkludiert
- Datenverarbeitung - Verkehrsvermessung und Überwachung
- Abmessungen - Höhe: ca. 1 Meter, Durchmesser: ca. 66 cm



- Gewicht - 34 kg
- Als Energiequelle dient ein Blei-Säure-Akkumulator mit einer Kapazität von 70 Ah

Mit den Abmessungen von einem Meter Höhe, 66 cm Durchmesser und einem Gewicht von ca. 35 Kilogramm, ist der iCone nicht für den mobilen Einsatz geeignet. Auch die Detektion von kurzzeitigen, sehr dynamischen Verkehrsstörungen und die Mitnahme in den entsprechenden Einsatzfahrzeugen, wie im Falle des im Forschungsvorhaben entwickelten Intelligenten Leitkegels, kann bei besagten Abmessungen ausgeschlossen werden. Anwendungsschwerpunkt des iCone sind vornehmlich längerfristige Baustellenbereiche auf Überlandstraßen und Autobahnen. Hierbei kann mit der eingebauten Radarsensorik ein Verkehrs-Monitoring bis hin zur Staudetektion im Baustellenbereich betrieben werden.

### Intellicone

Ein ähnliches Gerät, mit dem auch vornehmlich die Sicherheit in Baustellenbereichen erhöht werden soll, ist der Intellicone der Firma Highway Resource Solutions Limited.

Hierbei handelt es sich um ein Batterie oder Akku betriebenes Gerät, welches als Aufsteckkomponente für herkömmliche Leitkegel angeboten wird und über Sensoren verfügt, mit denen ein Einschlag detektiert und per optischem oder akustischem Alarm an die Arbeiter im Baustellenbereich abgegeben wird. Darüber hinaus verfügt der Intellicone über Kommunikationsmodule für den Kurzstreckenfunk, für Entfernungen bis zu 50 Metern, mit denen Einschlagsmeldungen im Hopping-Verfahren über mehrere Intellicones, auch über größere Entfernungen, übertragen werden können. Mit einem zusätzlichem Mobilfunkmodul und einem gewöhnlichem GPS-Ortungsmodul kann die Crasch-Position per SMS an das Mobiltelefon eines Arbeiter übertragen werden oder aber per GPRS-Kommunikation an eine Web-Portal für Protokollierungszwecke.



Abbildung 61: Intellicone des Herstellers Highway Resource Solutions Limited in verschiedenen Varianten aus [35], © 2015 by Highway Resource Solutions Limited

Das Schutzprinzip basiert hierbei auf der Detektion der Verletzung eines Baustellenbereiches durch z. B. Überfahren eines entsprechenden Intellicones. In dieser schon kritischen

Situation werden dann ausschließlich die Baustellenarbeiter alarmiert. Eine Warnung andere involvierter Verkehrsteilnehmer, wie z. B. der Fahrzeugführer, zum Zwecke der frühzeitigen Informierung und somit zur Vermeidung gefährlicher Verkehrssituationen erfolgt nicht.

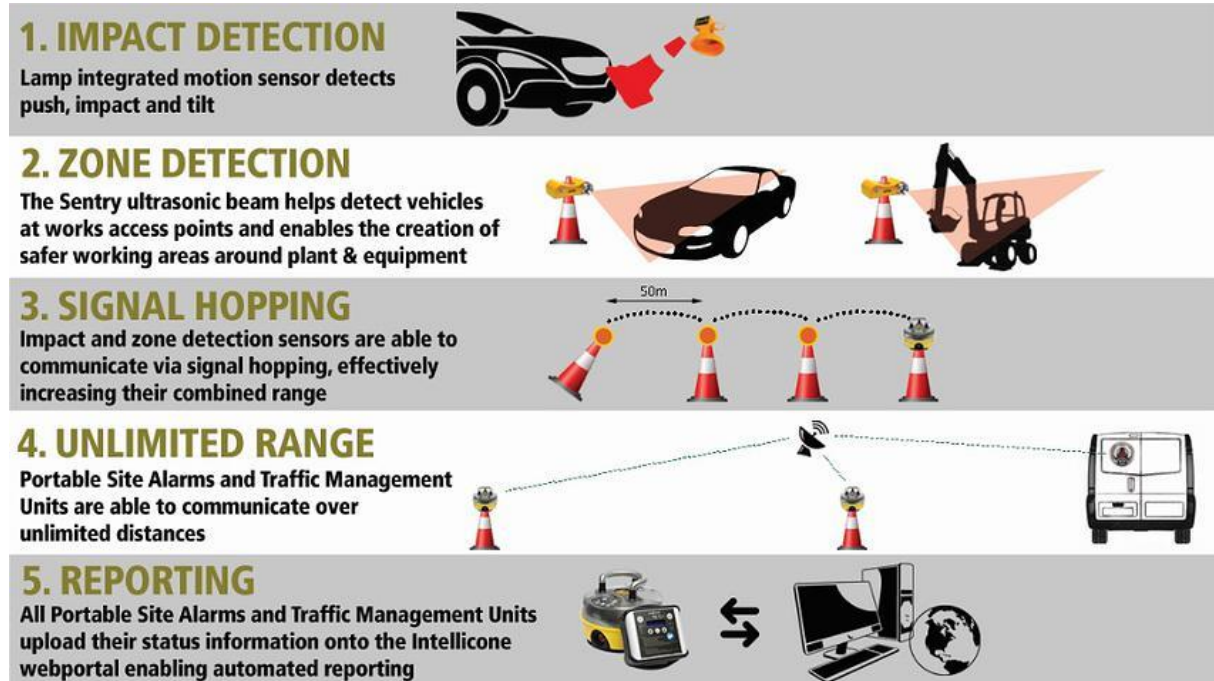


Abbildung 62: Eigenschaften und Anwendung des Intellicone-Systems aus [36]; © 2016 Trans Canada Traffic Inc.

### 3.12 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Im Forschungsvorhaben konnte bereits eindrucksvoll die Machbarkeit und das Potenzial der Kooperativen Schutzeinrichtung aufgezeigt werden.

Darüber hinaus verspricht sich das ifak, durch die Nutzung einzelner Forschungsergebnisse und durch dazugewonnene Expertisen, z.B. im Bereich der hochgenauen Ortung, die Erschließung neuer Anwendungsfelder im Bereich Intelligenter Verkehrssysteme.

Solche Ergebnisse und Expertisen fanden bereits Eingang in verschiedene andere, aktuell am ifak bearbeitete, Projekte sowie in diversen Akquisitionsbemühungen.

#### Zielgruppen und Zielmärkte

Unmittelbar profitieren Rettungs- und Einsatzkräfte vor Ort durch die Erhöhung der Sicherheit im Gefahrenbereich. Die schnellere und zuverlässigere Warnung des nachfolgenden Verkehrs auch bei schlechten Witterungsbedingungen kann Leben retten. Die Verfahren zur Erfassung und Protokollierung von Gefahrenstellen werden durch die

Automatisierung von Abläufen mit Hilfe des intelligenten Leitkegels signifikant schneller, zuverlässiger und kostengünstiger.

Mittelbar sind die vor Ort erfassten Daten für Behörden, Bürger und Wirtschaft nützlich, da durch die Erfassung und Verortung von Gefahrenstellen der Verkehr besser gelenkt und negative Einflüsse durch Staus, Umwege und Lärm reduziert werden können.

Die nahtlose Integration der Technik in den Arbeitsablauf der Servicekräfte und damit verbunden die Akzeptanz durch die Servicekräfte stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar. Damit verbunden sind auch entsprechende Aspekte des Datenschutzes um Bedenken, etwa das Gefühl der "Überwachung der Servicekräfte" auszuräumen.

### **Einschätzung der Entwicklung der Marktsituation (Trendprognose)**

Der Markterfolg hängt wesentlich davon ab, wie unter den schwierigen finanziellen Randbedingungen der öffentlichen Hand der vorhandene Mehrnutzen argumentiert und der Leitkegel zu attraktiven Preisen in die Zulassungs- und Beschaffungszyklen sowie die vorhandene technische Infrastruktur integriert werden kann.

Eine direkte Kostensenkung gegenüber dem bisher eingesetzten „mechanischen“ Leitkegel ist nicht zu erwarten, da zusätzliche IT verbaut wird. Das größte Potenzial liegt in der Einsparung zusätzlicher Ortungstechnik sowie der mittelbaren Vermeidung von Unfallfolgekosten.

Der Nutzen der dynamischen Unfall- bzw. Störstellenerfassung mit Hilfe der Kooperativen Schutzeinrichtung und des Intelligenten Leitkegels kann für die entsprechenden Zielgruppen etwa wie folgt zusammengefasst werden:

- Primärer Nutzen für:
  - Verkehrsteilnehmer
    - zeitnahe und situationsgerechte Information/Warnung vor Gefahrenstellen (VM-Aktorik, Fahrerassistenz)
  - Polizei
    - zeitnahe, automatische und genaue Verortung
    - erhöhte Sicherheit der Polizisten bei Arbeiten an Unfallstellen durch informierte Verkehrsteilnehmer
  - Rettungs- und Bergungskräfte
    - exakte Ortsangaben
    - erhöhte Sicherheit der Einsatzkräfte
  - Kommune/Straßenbaulastträger
    - Verkehrsmanagement, Eingriffe in die Verkehrssteuerung
    - zeitnahe Sicherheits- und Instandsetzungsmaßnahmen
- Sekundärer Nutzen für:
  - Verkehrsteilnehmer
    - Reisezeit: Information und ggf. Umfahrung bei Störungen oder Sperrungen

- Akzeptanzsteigerung (Ursachen, Prognose, Alternativen)
- Verkehrsmanagement
  - Verkehrsvermeidung (wenn Störungen vor Fahrtantritt bekannt sind)
  - zeitliche und örtliche Verlagerung des Verkehrs
- Technisches Polizeiamt/Statistik (EUSka, OKSTRA)
  - genaue Positionsbestimmung erleichtert die nachträgliche Georeferenzierung (Technisches Polizeiamt)
  - genaue Zeitbestimmung
  - Unterstützung und Vereinfachung der Arbeitsabläufe (Unfallkommission, Berichtswesen)

Schnelle Information bei Unfällen oder Störfällen rettet Leben und minimiert Unfallfolgen.

Bisherige Ansätze zur Datenerfassung an Gefahrenstellen setzen das aktive Agieren der Einsatzkräfte – bspw. über Smartphone-Apps – oder das bewusste Einrichten und Aktivieren von Erfassungsgeräten voraus. Das kollidiert häufig mit vorgeschriebenen Abläufen zur Eigen- und Fremdsicherung sowie zur prioritären Rettung von Leben und Infrastruktur. Der Intelligente Leitkegel fügt sich völlig transparent in die Abläufe der notwendigen Eigen- und Fremdsicherung am Einsatzort ein und erzeugt keinen zusätzlichen personellen oder organisatorischen Aufwand. Die eingesetzte Hardware ist robust gegenüber mechanischen und klimatischen Einflüssen, wartungsarm und zuverlässig.

### **Kooperative Schutzeinrichtung – Intelligenter Leitkegel als Treiber für ein integriertes Baustellenmanagement**

Einen weiteren Nutzen der Kooperativen Schutzeinrichtung wird in der digitale Baustellenverwaltung unter Nutzung von Geobasis- und Geofachdaten gesehen.

Motivation eines ganzheitlichen, digitalen Baustellenmanagement:

- Beantragung von Sperrgenehmigungen noch nicht vollständig digital (Antragstellung, Verschickung des Genehmigungsbescheides in Papierform)
- Oftmals Doppeleintragungen für Genehmigungsplanung und Baustelleninformationssysteme
- Position und Ausdehnung der Sperrung nicht kartenbasiert bzw. unzureichend integriert
- Mangelnde Aktualität der Baustellen infolge nicht korrekten Abmeldens durch Bauunternehmen (vorfristige Aufhebung der Behinderung)
- Hochgenaue Karten in Form von Geobasisdaten und Geofachdaten sind vorhanden

Die im Vorhaben UR:BAN entwickelten Lösungen, bezüglich der Kooperativen Schutzeinrichtung, sind als Module auch nahtlos in bestehende Anwendungen für Baustellenmanagement integrierbar. Durch die angestrebte Erweiterung des KSE-Ansatzes würde ein cloud-basiertes Baustellenverwaltungssystem zur Nutzung in Straßenverwaltungsbehörden, Ordnungsämtern, etc. entstehen. Hierbei würden sich folgende, interessante Anwendungsfelder ergeben:

- Vollständige digitale Bearbeitungskette, beginnend bei der Beantragung von Sperrgenehmigungen bis zur Versendung eines digitalen Genehmigungs-bescheides
- Cloudbasierte Applikation, einfache Nutzung durch jede Genehmigungsbehörde
- Fahrspurfeine Platzierung von Baustellen durch Integration hochgenauer Karten
- Nahtlose Integration in Baustellenplanungssoftware

### **Ausweitung des im Vorhaben entwickelten Lösungsansatzes hin zu einem komplexen Ökosystem eines integrierten Sicherheitsmanagement für den Straßenverkehr**

#### Problemlage:

Unvorhergesehene Störungen im Straßenverkehr wie Unfälle oder Havarien sind nicht nur für die Beteiligten eine Gefahr für Leib und Leben sondern bergen auch für den nachfolgenden Verkehr ein erhebliches Gefahrenpotenzial. Der Zeitraum vom Beginn der Störung bis zur Informationsverbreitung ist hier am kritischsten. Automatische Einrichtungen zur Warnung nachfolgender Verkehrsteilnehmer können hier einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit leisten. Die hierzu erforderlichen technischen Ausrüstungsgegenstände fehlen jedoch ebenso wie ein ganzheitlich angelegtes Informations- und Störungsmanagement.

#### Lösungsansatz und angestrebte Erweiterung:

Die angestrebte Erweiterung des im Forschungsvorhaben entwickelten Lösungsansatzes hat die Entwicklung eines integralen Gesamtsystems, bestehend aus den technischen Geräten einerseits und einem Softwarekomponenten-Bundle für das Informations- und Störungsmanagement andererseits, zum Ziel. Hierbei wird ausdrücklich keine Stand-Alone-Lösung angestrebt, vielmehr sollen bereits vorhandene Informations- und Managementsysteme in das System integriert werden.

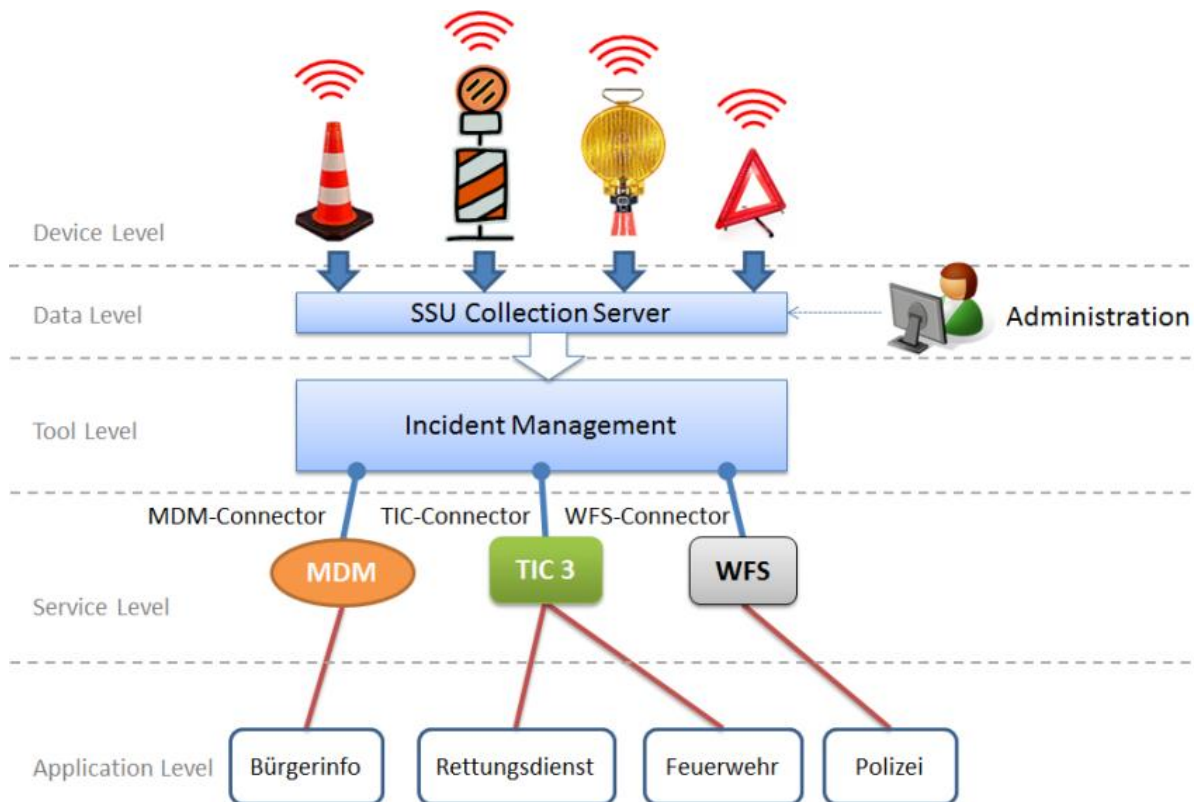


Abbildung 63: Lösungsansatzes für ein komplexes Ökosystem eines integrierten Sicherheitsmanagement für den Straßenverkehr

Die Idee und der Ansatz des im Vorhaben entwickelten Intelligenten Leitkegels kann sollte zweckmäßiger Weise auf andere Geräte, die eine warn und Sicherheitsfunktion, besonders im gestörten Verkehrsumfeld erfüllen, ausgeweitet werden. Die Gesamtheit der technischen Ausrüstungsgegenstände könnte dann z.B. aus den Geräten Intelligenten Leitkegel, Intelligente Bake, Intelligente Warnleuchte und Intelligentes Warndreieck bestehen. Sie werden unter dem Begriff Smart Safety Units (SSU) zusammengefasst. Allen SSUs ist gemeinsam, dass sie sich bei Aufstellung selbstständig hochgenau verorten sowie entsprechende Informationen an eine Datenzentrale (SSU Collection Server) senden. Über entsprechende Administrations-Tools kann der Einsatz von SSUs koordiniert sowie die SSUs selbst konfiguriert werden. Für das eigentliche Informations- und Störungsmanagement existiert eine Tool-Suite (Incident Management), welche der Koordinierung aller am Geschehen beteiligten Akteure dient. Konnektoren sind dabei verantwortlich für die Verbindung mit neuen bzw. vorhandenen Informationsmanagementsystemen wie dem Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM) oder dem TIC-System für die Verbreitung von Verkehrsinformationen.

Mögliche Anwendungsfelder besitzt das System bspw. bei Rettungskräften wie Polizei und Feuerwehr, welche den Intelligenten Leitkegel sowohl für die Absicherung von Unfallstellen als auch zur Verbreitung der Informationen an entsprechende Informationszentralen in Echtzeit nutzen können. Das Intelligente Warndreieck kann bspw. bei einer Autopanne vom

Fahrzeugführer aufgestellt werden, wobei eine automatisch generierte Warnmeldung sowie die hochgenaue und damit fahrspurfeine Position des havarierten Fahrzeugs übertragen und zur Verfügung gestellt werden, so dass eine sofortige Gefahrenwarnung durch entsprechende Dienste-Anbieter erfolgen kann.

### **Erweiterter Nutzen und mögliche Anwendungen durch die Verbreitung der KSE-Informationen über den Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM)**

Die Sicherstellung von Mobilität vor dem Hintergrund eines steigendem Verkehrsaufkommens und immer komplexer werdender Verkehrsinfrastruktur erfordert nicht zuletzt das Vorhandensein bedarfsorientierter intelligenter Mobilitätsdienste. Notwendige Voraussetzung hierfür ist eine umfassende Datengrundlage in Verbindung mit der Möglichkeit eines einfachen und standardisierten Datenzugriffs.

Die Möglichkeit eines einheitlichen und standardisierten Zugriffs auf Verkehrsdaten aller Art sowie deren einfache Verknüpfbarkeit eröffnet hierbei die Chancen für das Angebot einer Vielzahl neuartiger, intelligenter Mobilitätsdienstleistungen.

Der in [23] vorgestellte Dienst einer verkehrslageabhängigen Zielführung mit dynamischen Verkehrsdaten aus dem MDM zeigt die Möglichkeiten für die Entstehung von Mobilitätsdiensten auf, welche aus der Verfügbarkeit einer zentralen Datenaustauschplattform wie dem MDM mit standardisierten Zugriffsmechanismen erwachsen. Solche Dienste leben in erster Linie von der Qualität der Eingangsdaten.

Hier kann der im Vorhaben entwickelte Ansatz, mit der erfolgreichen Anbindung an den MDM als wichtiges Ergebnis, sowohl die Entwicklung neuer Mobilitätsdienste befeuern, als auch bestehende Dienste entscheidend erweitern und verbessern.

Zu nennen wären hier Dienste wie z. B.:

- Dynamischeres Routing, Premium-Routing (auch Offlinerouting)
- aktuelle Informationen für Leit- und Einsatzwarten für die Flottenkoordinierung
- Informationen für Verkehrsmanagementzentralen,
- verbesserte Ankunftszeitprognose für den ÖPNV

## **4 Testen kooperativer Systeme und Car2X-Applikationen**

### **4.1 Testsystem für kooperative Systeme und Car2X-Applikationen**

#### **4.1.1 Motivation**

Kooperative Systeme stehen vor der Einführung in den Verkehrsalltag, erste Funktionen werden erprobt und implementiert. Applikationen auf Basis kooperativer Systeme müssen eine ausreichend hohe Qualität aufweisen, damit sie von Anwendern akzeptiert und verwendet werden. Da hier verschiedene Komponenten/Teilsysteme von unterschiedlichen Herstellern miteinander kooperieren, ist ein neutrales Vorgehen für die Bewertung der Qualität der Funktionen notwendig.

Ein wesentliches Qualitätskriterium ist die korrekte Funktion einer Applikation. Hierfür sind bereits während der Entwicklung umfassende, systematische Tests erforderlich. Sie müssen für eine ausreichend hohe Testabdeckung automatisiert durchgeführt werden. Nur so können Entwicklung, Einführung, Qualitätssicherung und Betrieb kooperativer Systeme im Verkehr mit der notwendigen Akzeptanz gewährleistet werden.

Die Entwicklung von Car2X-Applikationen betrifft zu einem großen Teil die Softwareentwicklung. Hier kann, je nach Domäne, der Anteil des Testens bis zu 50 % betragen [37]. Je später Fehler im Laufe des Projektes erkannt werden, desto höher sind die Kosten zur Beseitigung [38]. Daher sind effiziente Verfahren und Werkzeuge, die Entwickler und Tester bei ihrer Arbeit unterstützen, essentiell für den wirtschaftlichen Erfolg.

Viele Konzepte und am Markt verfügbare Systeme konzentrieren sich beim Thema Car2X auf die korrekte Übertragung von Daten über die Luftschnittstelle. Häufig wird überprüft, ob Datenpakete verloren gehen, z. B. durch Abschattung und Koexistenz-Probleme. Darüber hinaus sind jedoch erweiterte Methoden notwendig, die applikative Tests auf Systemebene ermöglichen. Dafür wurden neue Methoden entwickelt, die das Prüfen vorgegebener Soll-Sequenzen von Nachrichtenpaketen auf dem Kommunikationsmedium erlauben. Dies ermöglicht den Test auf einer höheren Abstraktionsebene und kann alle Kommunikationspartner zueinander in Beziehung setzen. Das Ziel ist, einen umfangreichen und möglichst weit automatisierten Systemtest für kooperative Verkehrssysteme bereitzustellen. Insbesondere soll die Überprüfung der gleichzeitigen Kommunikation zwischen sehr vielen Verkehrsteilnehmern sowie der Infrastruktur ermöglicht werden. Innerhalb von UR:BAN erfolgte die Entwicklung eines entsprechenden Testsystems und Erstellung eines Demonstrators.

#### **4.1.2 Testframework für hochverteilte Car2X-Applikationen**

Die Herausforderung beim Testen kooperativer Systeme im Verkehr liegt in erster Linie beim Beherrschen der Komplexität der entstehenden Applikationen. Die Komplexität ergibt sich vor allem aus der teilweise sehr hohen Anzahl miteinander kommunizierender Komponenten, wobei Echtzeitbedingungen die Komplexität noch weiter erhöhen können.



Für die Zusicherung hoher Qualitätsstandards bei der Inbetriebnahme und dem Betrieb kooperativer Applikationen ist ein hohes Maß an *Testautomatisierung* notwendig. Nur mit Testautomatisierung und der damit verbundenen hohen Anzahl an ausführbaren Testfällen bei der Testdurchführung kann die notwendige *Testtiefe* erreicht werden.

Aufgrund der Komplexität von Software und technischen Systemen sowie der Vielzahl an möglichen Eingabeparametern ist die korrekte Funktion eines Systems prinzipiell nie vollständig nachweisbar [37]. Stattdessen wird die Abwesenheit von Fehlern über einzelne *Testfälle* geprüft. Ein Testfall definiert dabei ein gegebenes Sollverhalten, wobei notwendige Stimulationen und Beobachtungen des Testobjekts spezifiziert und beschrieben werden. Die Beschreibung eines Testfalls erfolgt durch eine formale Notation. Das Erstellen von Testfällen für das Erreichen einer ausreichend hohen Testtiefe ist eine sehr aufwändige Aktivität und erfordert ein systematisches Vorgehen. Dabei ist stets ein Kompromiss zu finden, welcher Aufwand sich für welche Testtiefe lohnt. Methoden zur automatischen Testgenerierung können hier helfen, waren aber nicht Fokus der Arbeiten in UR:BAN.

Mit Hinblick auf kooperative Verkehrssysteme stellen diese als Gesamtheit ein verteiltes System dar, in dem einzelne Komponenten (wie Fahrzeuge und Infrastruktur) miteinander kommunizieren. Kommunikationsstandards wie Car2X bzw. WLANp, DATEX2, OTS etc. bieten entsprechende Schnittstellen. Ebenso können einzelne Komponenten als in sich abgeschlossenes System betrachtet werden. Sie werden *System Under Test* (SUT) genannt.

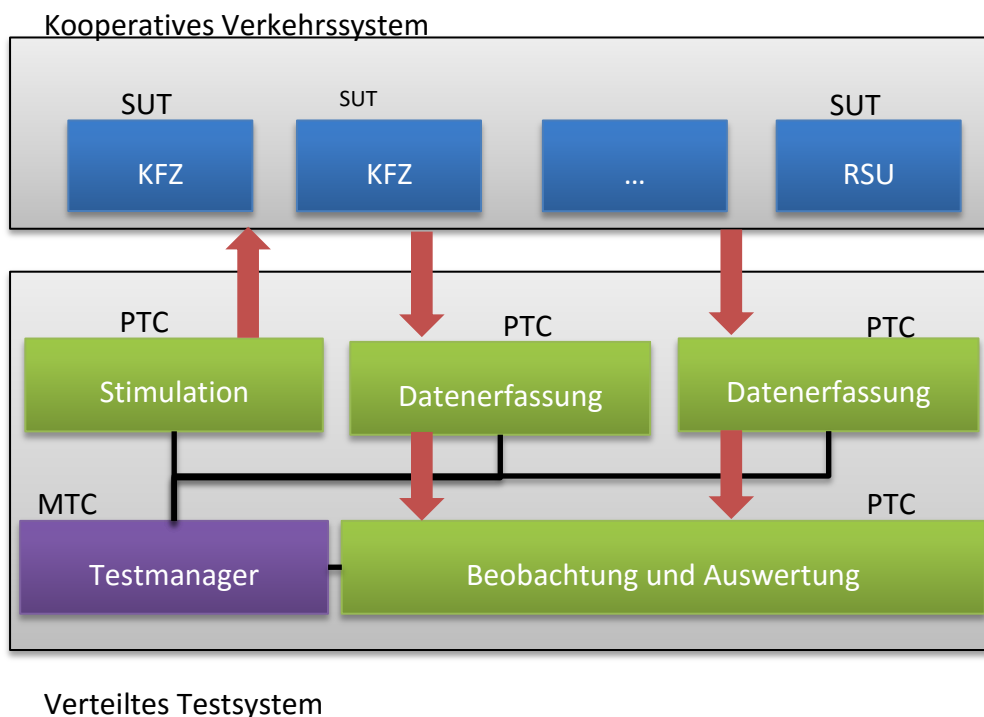


Abbildung 64: Struktur eines verteilten Testsystems zum Testen eines kooperativen Verkehrssystems

Für die Tests einzelner Komponenten werden klassische Black Box-Testverfahren angewendet. Bei diesen wird davon ausgegangen, dass die innere Struktur der SUTs nicht einsehbar ist und ihr Verhalten lediglich über von außen zugängliche Schnittstellen geprüft werden kann [37]. In diesem Fall ist dies die Funkkommunikation über Car2X. Um dies effizient testen zu können, ist ein ebenso *verteilt*es Testsystem erforderlich, was in Abbildung 64 dargestellt ist. Es soll folgende Aufgaben übernehmen:

- Stimulation von SUTs durch Generierung von (Car2X)-Daten, die über die Luftschnittstelle verbreitet werden. Dazu können *Cooperative Awareness Messages (CAMs)* und *Decentralized Environmental Notification Messages (DENMs)* zählen, die passend zu einer Verkehrssimulation erzeugt werden. Solche Daten sollen die SUTs anregen, entsprechend zu reagieren und selbst Netzwerkdaten zu erzeugen.
- Datenerfassung der Netzwerkdaten, um das von außen beobachtbare Verhalten der SUTs aufzuzeichnen. Dies kann über (Car2X)-Funkgeräte zum Mitschneiden und eine entsprechende Dekodierung geschehen. Die Datenerfassung kann prinzipiell dezentral an mehreren Stellen geschehen, um Kommunikation an räumlich getrennten Orten oder über verschiedene Medien mitschneiden zu können.
- Auswertungs-Komponente, die die Datenströme der Datenerfassungen zentral zusammenführt, analysiert und ein Testurteil fällt.

All diese Aufgaben werden durch parallele Testkomponenten (Parallel Testing Components, PTCs [6]) übernommen. Ein Testmanager (MTC) steuert alle PTCs zentral. Die Begriffe sind dem ETSI-Standard *Testing and Test Control Notation (TTCN-3 [6])* entnommen.

An den Ansätzen von TTCN-3 orientiert sich auch die Notation der Testparametrierung. In der Praxis spezifiziert der Anwender solcher Systeme die erforderlichen Testkomponenten, -Daten und -Logik auf einem hohen, abstrakten Niveau. Das Kodieren und Dekodieren der abstrakten Testdaten und der Testlogik wird dann zur Laufzeit der Testfälle durch spezielle Testadapterimplementierungen realisiert und bereitgestellt.

Für das Testframework wurden in UR:BAN essentielle Methoden zur Testdatenerzeugung, zur Stimulation mit realen Car2X-Nachrichten und für das Monitoring inklusive Auswerten der Netzwerkkommunikation entwickelt und integriert. Die prinzipielle Vorgehensweise der Definition des Testsystems ist zunächst unabhängig von Domäne (wie Verkehrssystemen), genutzten Verfahren (wie TTCN-3) und integrierten Werkzeugen.

#### **4.1.3 Verkehrssimulationen zur Testdatenerzeugung und Stimulation durch Car2X-Daten**

Eine Herausforderung beim Testen von kooperativen Car2X-Applikationen ist das Erstellen relevanter Verkehrsdaten für die Stimulation der Testobjekte. Mittlerweile existieren einige Simulationswerkzeuge (z. B. Vissim [39], SUMO [32], AnyLogic [40]) für die Erzeugung und Ausführung relevanter Verkehrsszenarien. Die Ergebnisse können in einem nächsten Schritt

zur Stimulation der gesamten Car2X-Applikation verarbeitet werden. Abbildung 65 zeigt den prinzipiellen Ablauf, wie er für die kooperative Schutzeinrichtung umgesetzt wurde.

Für das Testen müssen diese Verkehrssimulationen in die Testumgebung integriert, das heißt beschrieben, parametrisiert und gestartet werden. Diese Integration sollte möglichst einfach gestaltet werden, damit auch ein Testingenieur in der Lage ist, geeignete Simulationsszenarien zu erstellen und auszuführen. Für diesen Zweck wurden allgemeine Parameter identifiziert, mit denen gängige Szenarien für Verkehrssimulationen beschrieben werden können. Dazu zählt beispielsweise die *logische* Kreuzungstopologie mit Anzahl und Art der Fahrspuren, jedoch ohne Koordinaten. Weiterhin können die allgemeinen Simulationsschritte und die Fahrzeugverteilung angegeben werden, z. B. 80 % KFZ und 20 % Motorräder.

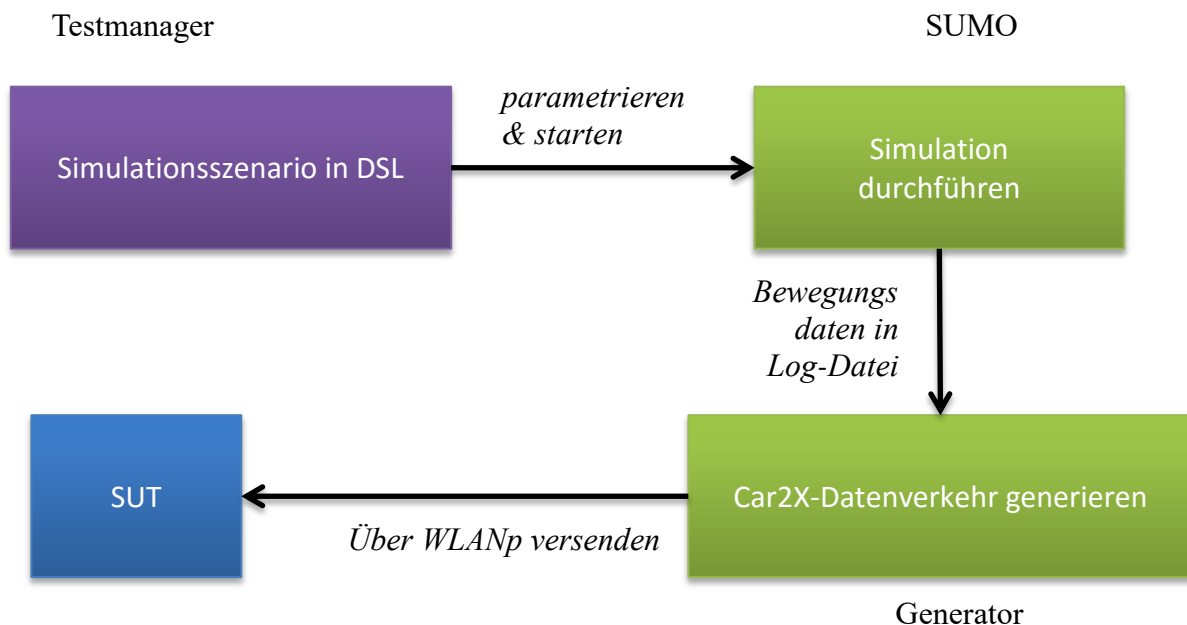


Abbildung 65: Ablauf beim Erzeugen von Testdaten zur SUT-Stimulation

Für die Beschreibung wurde eine einfache Sprache entwickelt (siehe Abbildung 66), die es auch einem Testingenieur erlaubt, Verkehrssimulationen für die Testdatenerzeugung zu verwenden. Dementsprechend ist sie eine *domänenspezifische Sprache* (DSL). Das Test-Management-Tool bietet hierfür einen Editor. Für die prototypische Umsetzung wurde dieses Vorgehen mit der Anbindung von SUMO [32] als Verkehrssimulationssystem umgesetzt.

```

1 import TrafficSim 1.0
2
3 TrafficSimulation
4 {
5   Intersection
6   {
7     name: "intersection 47"
8     accident: 0.1
9     hasTrafficLight: true
10    objects: [
11      VehicleDistribution
12      {
13        name: "customDistribution"
14        car: 0.8
15        motorcycle: 0.2
16      }
17    ]
18    arms: [
19      Arm
20      {
21        name: "1"
22        lanes: "Pedestrian|Bicycle|CarIn|CarIn|CarIn|CarOut|CarOut|Bicycle|Pedestrian"
23      },
24      Arm
25      { ... }
26    },
27      Arm
28      { ... }
29    },
30      Arm
31      { ... }
32    ]
33  }
34  trafficLights: [
35    TrafficLight
36    {
37      duration: 10
38      name: "lsa-md-mitte"
39      type: "static"
40      turns: 10
41    }
42  ]
43 }
44
45 steps: [
46   Step{
47     start: 0
48     end: 100
49     movements: [
50       VehicleMovement
51       {
52         startArm: "1"
53         vehiclePerHour: 1000
54         vehicleDistribution: "customDistribution"
55       },
56       VehicleMovement
57       { ... }
58     ]
59   }
60 ]
61
62

```

Abbildung 66: Deklarationsprache zur Beschreibung von Simulationsszenarien

SUMO kann auf die Parametrierung zugreifen und eine Verkehrssimulation durchführen. Es entsteht eine Log-Datei, die für jeden Simulationsschritt Zustandsdaten über simulierte Verkehrsteilnehmer wie KFZ oder auch Radfahrer enthält. Hier werden auf einem *logischen* Level die Simulationsergebnisse beschrieben. Für die Verwendung zur realen Stimulation eines SUT müssen die Logdateien analysiert und in *reale Testdaten* umgesetzt werden. Dies geschieht durch das Einlesen einer Car2X-Topologie-Nachricht (TOPO). Die realen Testdaten

enthalten nun die genauen Koordinaten im WGS 84-System. Nun lassen sie sich auch auf einer Karte visualisieren.

Weiterhin wurde eine Generator-Komponente entwickelt, die standardisierte Car2X-Nachrichten (CAM, DENM etc.) aus den Simulationsergebnissen erzeugen kann. Sie liest aus den realen Testdaten für jeden Simulationsschritt die Bewegungsdaten der Verkehrsteilnehmer, z. B. Position und Geschwindigkeit. Somit lassen sich anhand des Objekttyps die erforderlichen Funk-Nachrichten generieren. Für Fahrzeuge werden CAMs erstellt und die entsprechenden Parameter gesetzt.

Die Richtung (Heading) für die CAM ist nicht direkt aus dem SUMO-Log auslesbar. Stattdessen muss anhand der aktuellen Fahrspur die Fahrtrichtung interpretiert werden. Letztendlich lassen sich alle Pflichtparameter einer CAM setzen und zum Teil durch optionale ergänzen. Dazu zählt auch ein gesetzter Blinker (bzw. Fahrtrichtungsanzeiger). Über ein angeschlossenes WLANp-Modul (mit entsprechendem Chipsatz und Antenne) werden die CAMs versendet und können vom SUT empfangen werden.

Die Testdaten-Generierung ist aber nicht nur auf eine Funktechnologie beschränkt. So greift eine durch das ifak entwickelte, kooperative Verkehrsanwendung auf Car2X (bzw. WLANp) für motorisierte und herkömmliches WLAN (b/g/n) für Radfahrer zurück. Um solch ein System zu stimulieren, erzeugt die Generator-Komponente für alle simulierten Radfahrer WLAN-Telegramme und versendet sie ebenfalls über eine entsprechende Schnittstelle.

#### **4.1.4 Monitoring und automatisierte Auswertung der Netzwerkkommunikation**

Das Monitoring inklusive der automatisierten Auswertung der Netzwerkkommunikation an der Luftschnittstelle ist von essentieller Bedeutung beim Testen von kooperativen Car2X-Applikationen. Nur so können Testszenarien durchgeführt werden, ohne direkt die beteiligten Komponenten/Teilsysteme über Testschnittstellen oder Ähnliches abfragen zu müssen. Erste Ansätze dafür wurden bereits in [41] beschrieben und in UR:BAN signifikant weiterentwickelt, wobei insbesondere die Integration in das Testframework im Vordergrund stand.

Wie eingangs erläutert wurde, wird ein SUT als Black Box verstanden. Die Prüfung seines Verhaltens und damit der installierten Applikationen geschieht durch das Mitschneiden der Car2X-Kommunikation. Sicherlich sind dadurch nicht alle internen Zustandsdaten erfassbar. Dieser Ansatz bietet dagegen den Vorteil, keine extra Test- oder Debugging-Schnittstellen zu benötigen. Dies erleichtert den Zugang für externe Tester und ermöglicht den einheitlichen Test von Geräten verschiedener Hersteller. Zudem ist der Car2X-Datenverkehr standardisiert, sodass Geräte zum Mitschneiden und Auswerten ebenfalls austauschbar sind.

Zum Mitschneiden ist zunächst ein WLANp-fähiges Modul nötig. Hierfür eignen sich z. B. auch WLAN-Router, deren Funkchip im 5,9 GHz-Band betrieben werden kann. Die Interpretation der Car2X-Daten mithilfe einer Protokollspezifikation ist in diesem Gerät noch nicht nötig. Erst wird der rohe Datenstrom zu einer Auswerteeinheit weitergeleitet, bei

Bedarf auch von mehreren Datenerfassungs-Geräten. Erst jetzt beginnt die Dekodierung und Interpretation der Daten.

Für den Car2X-Anteil ist ein entsprechender Dekodierer erforderlich. Dieser lässt sich automatisch aus den Protokoll-Spezifikationen generieren, die im ASN.1-Format vorliegen. Dies geschieht in der Praxis über einen ASN.1-Compiler, von denen kommerzielle als auch freie Werkzeuge existieren. Sie erzeugen aus der Spezifikation Programmcode (z. B. für C++), der Car2X-Telegramme vollständig dekodiert und eine Struktur mit allen enthaltenen Parametern zur weiteren Benutzung bereitstellt. Der Einsatz einer neuen Car2X-Spezifikation (z. B. nach erfolgter Normung durch die ETSI) lässt sehr einfach neuen Code erzeugen und erfordert daher nur geringen Anpassungsaufwand.

Die dekodierten Nachrichten können über Sequenzdiagramme visualisiert werden. Dazu werden Car2X-Parameter wie actionID und CAM-StationData interpretiert, um die Art des Senders zu ermitteln.

Ein Kern des neuen Testansatzes ist nun, dass die mitgeschnittenen Daten nicht nur einzeln, sondern im Zusammenhang geprüft werden. Dazu müssen ganze Kommunikationssequenzen ausgewertet werden, wobei die Nachrichtenhistorie genutzt wird. Beispielsweise lässt sich so prüfen, ob eine Applikation nach einer bestimmten Abfolge von Stimulationsdaten mit einer bestimmten Folge von Nachrichten reagiert.

Ein entsprechendes Framework zum Testen allgemeiner verteilter Systeme wurde durch das ifak in UR:BAN signifikant weiterentwickelt. Dieses generiert aus sequenzbasierten Testfällen automatisch Petrinetze, da erst diese den verteilten Systemzustand nachverfolgen können. Unter anderem erlaubt dieses modellbasierte Vorgehen, parallele Kommunikationssequenzen abzubilden und gegen mitgeschnittene Daten zu prüfen.

Es erfolgte nun die Integration in das übergeordnete Testsystem für kooperative Verkehrssysteme. Mussten Testfälle bzw. Sollsequenzen zuvor noch von Hand generiert werden, so geschieht dies nun automatisch durch ein *Testorakel*. Dies ist ein Algorithmus der Generator-Komponente. Er weiß anhand der Simulationsdaten, mit welchen Nachrichten ein SUT stimuliert wird, und kann abschätzen, wann und wie es reagieren wird. Zum Beispiel kann ein SUT durch Stimulation mit simulierten CAMs mit einer DENM antworten. Dieses erwartete Verhalten wird als textuelle Sequenz der Auswertungs-Komponente übergeben, in ein Petrinetz umgewandelt und im dynamischen Test für jede dekodierte Nachricht über ein Feuern der enthaltenen Transitionen verifiziert. Erst beim Erreichen eines als Endstelle spezifizierten Knotens im Graphen gilt ein Testfall als erfüllt. Dies bedeutet, dass alle zur Erfüllung dieses Sollverhaltens erforderlichen Nachrichten nachgewiesen werden konnten.

#### **4.1.5 Case Study für Testen der UR:BAN-Applikation Radfahrerschutzeinrichtung**

Am ifak wurde im Rahmen von UR:BAN, neben dem Testsystem, die Umsetzung weiterer Car2X-Applikationen erforscht. Eine davon ist die *Radfahrer-Schutzeinrichtung (SK 34)*. Über eine Road Side Unit (RSU) werden an Straßenkreuzungen Bewegungsdaten von Fahrzeugen und Radfahrern gesammelt, um Kollisionen vorherzusagen und betroffene

Verkehrsteilnehmer zu warnen. Dies geschieht über Car2X für Fahrzeuge und über WLAN für Radfahrer. Abbildung 67 zeigt das Prinzip in einer Übersicht.

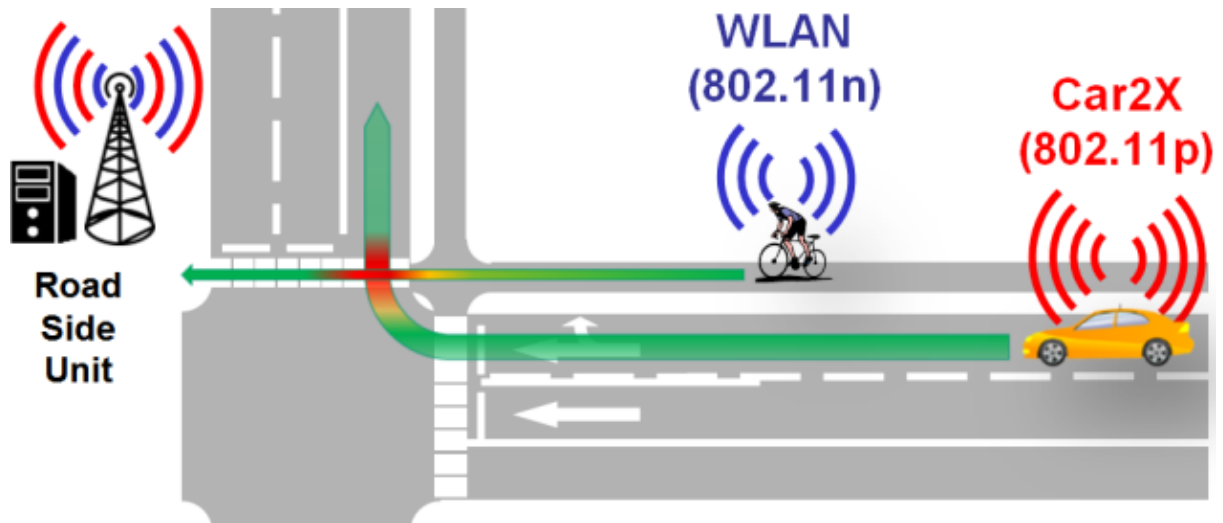


Abbildung 67: Übersicht der zu testenden Radfahrerschutz-Applikation (mit Grafiken aus [12])

Zur Kollisionsvorhersage sind, je nach Verkehrsaufkommen, alle möglichen Paarungen von Fahrzeugen und Radfahrern zu prüfen. Somit stellt die gleichzeitige Kommunikation von vielen Individuen mit der Road Side Unit ein Kriterium zur korrekten Funktion des Systems dar. Der reale Einsatz vieler Verkehrsteilnehmer und das Nachspielen des Szenarios würden jedoch einen hohen Aufwand darstellen und wären nicht exakt wiederholbar. Zudem könnten, ohne den Einsatz kostspieliger Crash-Vorrichtungen, keine Unfall-nahen Szenarien nachgestellt werden.

Hier eignet sich das Testsystem ausgezeichnet zur einfachen Prüfung der Kollisionsvorhersage. Das System Under Test ist lediglich die Road Side Unit. Abbildung 68 zeigt einen eigens hierfür konstruierten Demonstrator, der alle erforderlichen Aufgaben erfüllt und die Funktionsweise übersichtlich darstellt.

Für den Testmanager, die Verkehrssimulation sowie den Versand der WLAN-Daten genügt ein PC. Zur Kommunikation über Car2X finden Geräte wie Wavebee (Nordsys) und Linkbird (NEC) Verwendung. Zur Erfassung von Car2X- und WLAN-Nachrichten werden zwei Drahtlos-Router von Mikrotik eingesetzt. Damit besteht die Implementierung des Testsystems vorrangig aus Software und ist mit handelsüblicher Hardware ausführbar.



Abbildung 68: Testsystem-Demonstrator auf der UR:BAN-Abschlussdemo

Für die Verkehrssimulation wurde die Forschungskreuzung in Braunschweig logisch nachgebildet, das heißt, zunächst nur mit der korrekten Anzahl von Zufahrten und Fahrspuren. Ebenso liegt eine Car2X-TOPO-Nachricht bereit, die im Rahmen von UR:BAN-Tests vor Ort aufgezeichnet wurde. Außerdem wurde das grundlegende Verhalten der Radfahrerschutz-Applikation im Testorakel hinterlegt: Sobald ein Fahrzeug und ein Radfahrer einen gewissen Abstand vom Kreuzungs-Referenzpunkt unterschritten haben, sollen Warnungen verschickt werden.



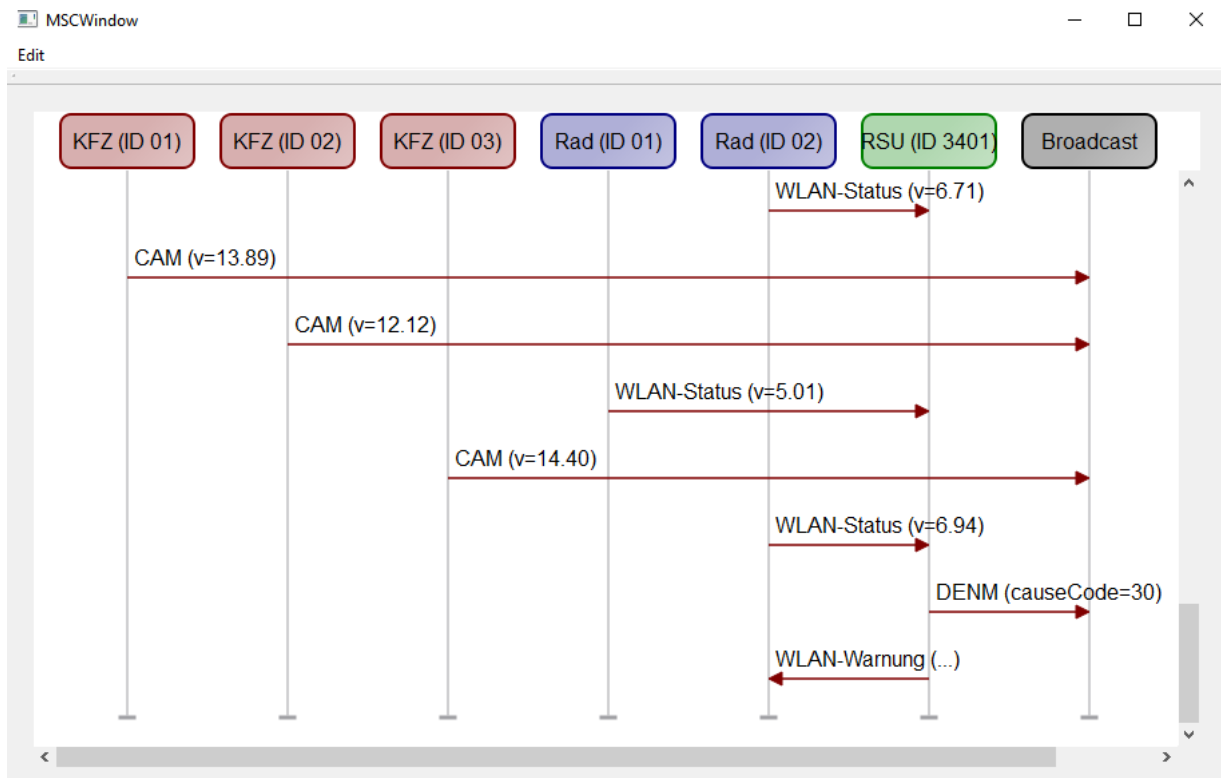


Abbildung 69: Darstellung des mitgeschnittenen Netzwerkverkehrs als Sequenzdiagramm

All dies ist vorparametriert, sodass am Demonstrator nur noch der Test über den Test-Manager zu starten ist. Die Simulation wird durchgeführt und reale Car2X- und WLAN-Daten generiert, die die Road Side Unit stimulieren. Auf ihr läuft die Radfahrerschutzapplikation. Intern erstellt das Testorakel einen Testfall und übergibt ihn an die Auswertungs-Komponente. Car2X- und WLAN-Daten werden mitgeschnitten und über einen Monitor sowie die Analyse-Komponente dargestellt (siehe Abbildung 69). Hier kann der Betrachter nachvollziehen, wie Fahrzeuge und Radfahrer CAMs bzw. WLAN-Statusnachrichten versenden. Schließlich ist in der Simulations-Visualisierung zu sehen, wie ein Fahrzeug und ein Radfahrer sich gemeinsam der Kreuzung nähern. Zur gleichen Zeit ist im Sequenzdiagramm der Versand der erforderlichen Warnungen an beide Verkehrsteilnehmer zu sehen. Abschließend meldet die Auswertungs-Komponente die korrekte Erfüllung seines Testfalls.

## 4.2 Leitfaden für den Test kooperativer Systeme

Applikationen auf Basis kooperativer Systeme müssen eine ausreichend hohe Qualität aufweisen, damit sie von Anwendern akzeptiert werden und insbesondere bei sicherheitskritischen Funktionen keinen Schaden anrichten. Da hier verschiedene Komponenten und Teilsysteme von unterschiedlichen Herstellern miteinander kooperieren, ist ein neutrales Vorgehen für die Bewertung der Qualität der Funktionen sinnvoll. Ein wesentliches Qualitätskriterium ist die korrekte Funktion einer Applikation. Hierfür sind

umfassende, systematische Tests erforderlich, die für eine ausreichend hohe Testabdeckung automatisiert durchgeführt werden müssen.

Eine Herausforderung bei der Einführung kooperativer Systeme ist die Qualitätssicherung auf Betreibersicht. Fehlfunktionen im laufenden Betrieb führen zu fehlender Akzeptanz bei den Verkehrsteilnehmern und können bei sicherheitsrelevanten Applikationen schwerwiegende Folgen haben. Durch die zwangsläufige Heterogenität der entstehenden Applikationen entstehen hier große Herausforderungen für die Betreiber, die sich mit verschiedenen Herstellern unterschiedlichster Komponenten (Fahrzeuge, Verkehrsinfrastruktur, Radfahrer/Fußgänger, etc.) im Zweifelsfall auseinandersetzen müssen. Diesen Herausforderungen kann mit konsequentem Einsatz von Kommunikationsstandards und umfassender Qualitätssicherung im Vorfeld der Inbetriebnahme begegnet werden. Daneben werden leistungsfähige Methoden und Werkzeuge für das Monitoring der Applikationen zur frühzeitigen Fehleridentifikation benötigt. Im Rahmen von UR:BAN KI wurde ein Testleitfaden erstellt, in dem die Anwendung solcher Methoden und Werkzeuge beschrieben wird. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte erläutert.

#### **4.2.1 Vorgehen für den Test kooperativer Systeme im Verkehr**

Bevor Applikationen auf der Basis kooperativer Systeme getestet werden, müssen in einem ersten, essentiellen Schritt die erwarteten Eigenschaften der kooperativen Applikation genau spezifiziert und zwischen Betreiber und Auftragnehmer abgestimmt werden. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf dem geforderten Verhalten der gesamten kooperativen Applikation, wobei das Gutverhalten und insbesondere auch das Fehlverhalten spezifiziert werden müssen. Hierzu ist die Spezifikation des geforderten Verhaltens der einzelnen Komponenten an den zugänglichen Schnittstellen notwendig.

Nachdem die Features und Schnittstellen spezifiziert und zwischen Betreiber und Auftragnehmer abgestimmt wurden, können die eigentlichen Testaktivitäten beginnen. Das prinzipielle Vorgehen beim Testen kooperativer Systeme unterscheidet sich dabei nicht von etablierten Testprozessen. Hier sei auf den fundamentalen Testprozess nach ISTQB verwiesen. Dieser ist in Abbildung 70 dargestellt und unterscheidet die einzelnen Phasen *Planung und Steuerung, Analyse und Design, Realisierung und Durchführung, Auswertung und Bericht* sowie *Abschluss*. Dabei beeinflussen sich diese gegenseitig iterativ.

Dabei ist es unerheblich, ob die Testaktivitäten direkt beim Betreiber oder durch einen beauftragten Testdienstleister erfolgen.

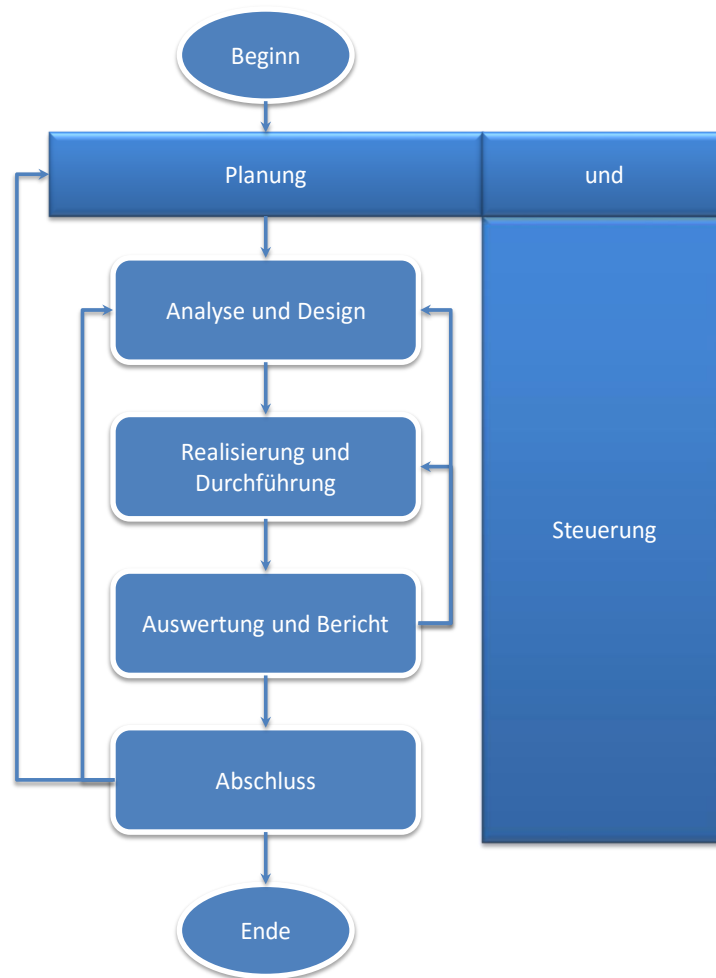


Abbildung 70: Fundamentaler Testprozess nach ISTQB (ebd.)

#### 4.2.2 Testautomatisierung

Die Herausforderungen beim Testen kooperativer Systeme im Verkehr liegen in erster Linie beim Beherrschen der Komplexität der entstehenden Applikationen. Die Komplexität ergibt sich dabei in erster Linie aus der teilweise sehr hohen Anzahl miteinander kommunizierender Komponenten, wobei Echtzeitbedingungen an die Kommunikation die Komplexität noch weiter erhöhen können.

Für die Zusicherung hoher Qualitätsstandards bei der Inbetriebnahme und dem Betrieb kooperativer Applikationen ist ein hohes Maß an Testautomatisierung notwendig. Nur mit Testautomatisierung und der damit verbundenen hohen Anzahl an ausführbaren Testfällen bei der Testdurchführung kann die notwendige Testtiefe erreicht werden.

Die Beherrschung dieser hochgradig verteilten Systeme stellt hohe Anforderungen an die Testsysteme, da diese ebenfalls verteilt sein müssen, um die notwendigen Stimulationen und Beobachtungen realisieren zu können. Hier ist eine gründliche Analyse des Marktes notwendig, um das passende Testwerkzeug auszuwählen. Es empfiehlt sich dabei,

featurebasiert die notwendigen Testfälle logisch zu spezifizieren und Testsysteme zu identifizieren, die diese Testfälle automatisiert ausführen können. Gespräche mit Testsystemanbietern über notwendige Erweiterungen ihrer Produkte können ebenfalls helfen, die notwendige Testinfrastruktur für eine hochgradig automatisierte Testdurchführung bereitzustellen.

#### 4.2.3 Frühe Fehleridentifikation im Betrieb durch Monitoring

Durch das Testen von komplexen Applikationen, wie sie kooperative Systeme bereitstellen, können nicht alle Fehler identifiziert werden. Auch bei gut implementierten Testprozessen und den sich daraus ergebenden, qualitativ hochwertigen kooperativen Applikationen, kann Fehlerfreiheit nicht garantiert werden. Deshalb ist es wichtig, während des Betriebs von kooperativen Applikationen, möglichst frühzeitig Fehler zu identifizieren. Dafür können und sollten regelbasierte Werkzeuge verwendet werden, mit denen das Monitoring kooperativer Systeme automatisiert möglich ist. Inkonsistentes Verhalten auf dem Kommunikationssystem kann so schnell und automatisiert identifiziert und dem Betreiber gemeldet werden, der daraufhin entsprechende Maßnahmen einleiten kann.

#### 4.2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für die Realisierung hoher Qualitätsstandards von Applikationen auf der Basis kooperativer Systeme hohe Anforderungen an Testprozess, -personal und -infrastruktur gestellt werden. Die wichtigsten Punkte, die dabei beachtet werden sollten, sind:

- Umfassende Spezifizierung der erwarteten Features der kooperativen Applikation. Features können dabei verschiedene Aspekte beleuchten, wie z. B. Funktionalität (Sicherheit), Performance, Emission, Durchsatz, Komfort, etc. Die Spezifikation der Features sollte mit dem Auftragnehmer in einem weiteren Schritt hinsichtlich erwartetes Verhalten an den zugänglichen Schnittstellen (Gut- und Fehlverhalten) verfeinert und abgestimmt werden (aussagekräftiges Lasten-/Pflichtenheft).
- Priorisierung der Features hinsichtlich zu erreichender Testtiefe
- Systematische Erstellung der notwendigen Testfälle
- Anstreben hoher Automatisierungsgrade bei der Testdurchführung, Bereitstellung der notwendigen Testinfrastruktur, Auswahl geeigneter Testwerkzeuge, ggf. Schulung des Testpersonals
- Automatisiertes und regelbasiertes Monitoring der kooperativen Applikationen im laufenden Betrieb zur frühen Fehleridentifikation und -bereinigung

Weitere Informationen und detaillierte Erläuterungen sind in einem separat vorliegenden „Leitfaden für das Testen kooperativer Systeme im Verkehr“ verfügbar, der innerhalb von UR:BAN erstellt wurde und interessierten Stakeholdern online zur Verfügung gestellt wird.

### **4.3 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse**

Im Teilprojekt KI hat das ifak im Wesentlichen ein Testframework für das ausgiebige und systematische Testen verteilter Applikationen entwickelt und auf einem prototypischen Level umgesetzt. Anwendungsfelder waren dabei das Testen kooperativer Systeme auf Seiten der Infrastruktur und vernetzte Mobilitätsapplikationen (Car2X-Applikationen).

Innerhalb der Arbeiten am Testframework entstanden Teilergebnisse, die sich auch für eine separate Verwertung eignen werden. Hier seien die Deklarationssprache für Verkehrssimulationen (siehe Kapitel 4.1.3) und die Methode zur Beschreibung und Auswertung von Soll-Kommunikationssequenzen auf der Luftschnittstelle (Car2X-Kommunikation, Kapitel 4.1.4) erwähnt.

Mit der Deklarationssprache für Verkehrssimulationen ist es möglich, einfache Simulationsszenarien zu erstellen, ohne ein ausgewiesener Simulationsexperte zu sein bzw. umfangreiches Toolwissen des jeweiligen Simulationswerkzeugs zu besitzen. Sie wurde in erster Linie entwickelt, um Testingenieuren den Zugang zu Verkehrssimulationswerkzeugen wesentlich zu erleichtern und diese in ihre Testtoolchains einzubinden. Allerdings ist es auch denkbar, dass andere fachlich versierte Endanwender mit diesem Ansatz Simulationsprojekte mit einem signifikant geringeren Einarbeitungsaufwand durchführen können. Als mögliche Endanwender werden Mitarbeiter der öffentlichen Hand und Fachexperten aus der Industrie gesehen.

Die Methode zur Beschreibung und Auswertung von Soll-Kommunikationssequenzen auf der Luftschnittstelle können neben der Einbindung in verteilte Testsysteme auch eigenständige Monitoring- und Diagnosewerkzeuge entwickelt und bereitgestellt werden. Somit sind frühzeitige Identifikationen von Fehlern und/oder Ungereimtheiten bei Systemen im laufenden Betrieb möglich. Das erleichtert die Wartung und den Betrieb dieser mitunter sehr komplexen Systeme. Auch hier werden als mögliche Endanwender Mitarbeiter der öffentlichen Hand und Fachexperten aus der Industrie gesehen.

Die Arbeiten und Resultate zum Testframework für verteilte, kooperative Systeme und Car2X-Applikationen wurden durch einen praxisnahen Demonstrator (siehe Abbildung 68) evaluiert und der interessierten Öffentlichkeit auf der UR:BAN-Abschlusspräsentation und auf der Messe ConCarExpo 2016 (siehe Abbildung 71) in Düsseldorf präsentiert.

Mit der Bearbeitung der Projektinhalte in UR:BAN VV, Teilprojekt KI erwarb das ifak wesentliche methodische Kompetenzgewinne in verschiedenen Bereichen (u. a. Testen verteilter und Systeme, Verkehrssimulationen, Car2X-Kommunikation). Dieser Kompetenzgewinn wird dem ifak zukünftig als Basis für weitere wissenschaftliche und anwendungsorientierte Forschungsprojekte dienen und bei der Akquise dieser Projekte von enormem Vorteil sein.

Daneben konnte das ifak durch die Projektergebnisse aus UR:BAN sein Portfolio für neue industrielle Kooperationen und Partnerschaften zu den Themen

- Testen von Car2X-Applikationen
- Testen von kooperativen Systemen (infrastrukturseitig)
- Diagnose und Monitoring von kooperativen Systemen und Car2X-Applikationen
- Einfaches Verwenden von Verkehrssimulationen durch einfache Deklarationssprachen

erweitern. Das Feedback bei der Präsentation der Ergebnisse auf der UR:BAN-Abschlusspräsentation und auf der Messe ConCarExpo 2016 in Düsseldorf war sehr vielversprechend. Das ifak wird mit diesen Resultaten seine Marktposition als anwendungstarker Forschungspartner der Industrie in den Domänen Automotive und Transport stärken und wesentlich erweitern.

Ein weiteres Resultat aus UR:BAN VV, Teilprojekt KI ist der Testleitfaden für kooperative Systeme und Applikationen, der insb. Kommunen als spätere Betreiber dieser Systeme bei der Einführung und Wartung unterstützen soll. Der Testleitfaden wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erstellt und wird online interessierten Stakeholdern zur Verfügung gestellt. Das ifak wird seine traditionell starke Stellung als anwendungsnaher Forschungspartner für Kommunen durch die Sichtbarkeit im Testleitfaden weiter stärken.

Für eine ausführliche Darstellung der Verwertungsabsichten des ifak für die Projektergebnisse aus UR:BAN VV wird auf den Erfolgskontrollbericht verwiesen.

## 5 Ergebnisverbreitung

Das ifak als Institut der angewandten Forschung erwartete als ein wichtiges Projektergebnis den Aufbau von methodischer und verfahrenstechnischer Expertise sowie einen wissenschaftlichen Vorlauf, mit dem es sich weiterhin auf dem FuE-Markt behaupten kann. Da die Arbeiten des ifak innerhalb des Forschungsprojektes UR:BAN erfolgreich abgeschlossen wurden, sind die guten Aussichten für die wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit gegeben.

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit wird sich mit Beendigung des Vorhabens in Form der Beteiligung des ifak an künftigen Innovations- und Forschungsprojekten auf dem Gebiet der Intelligenten Verkehrssysteme einstellen. Diese als langfristig geplanten Vorhaben sind die Basis für einen weiteren personellen Ausbau des Geschäftsfeldes Verkehr und Assistenz im ifak. Die im Vorhaben entwickelten Lösungen sollen dabei die Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte bilden.

So ist geplant, die genannten Verfahren und Geräte hin zu einer weiteren Praxisreife zu führen, bzw. die im Forschungsvorhaben verfolgten Ansätze in effizienter und sinnvoller Weise zu erweitern.

### 5.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen von UR:BAN vom ifak als Beiträge zu den Arbeitspaketen sowie die federführend durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung eines Testframeworks für kooperative Systeme und vernetzte Mobilitätsapplikationen im Teilprojekt Kooperative Infrastruktur, zur Entwicklung der Schutzapplikationen SK-34 (Radfahrerschutzeinrichtung) und SK35 (Kooperative Schutzeinrichtung) im Teilprojekt Smarte Kreuzung, einschließlich der hierfür aufgewandten personellen und materiellen Ressourcen, waren notwendig und angemessen.

Die zur Erreichung des Projektziels erforderlichen und durchgeführten Arbeiten entsprachen mit den erlangten, in diesem Bericht beschriebenen Ergebnissen, den in der Vorhabenbeschreibung des Projektantrages detailliert dargelegten Planungen in einem hohen Maß der Übereinstimmung.

Die in den Planungen der Arbeitspakete definierten und formulierten Aufgabenstellungen wurden vom ifak erfolgreich im vorgegebenen finanziellen und terminlichen Rahmen bearbeitet. Über die geplanten Ressourcen hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewandt werden.

Die Resonanz auf die im Ergebnis der geleisteten Arbeiten durchgeführten Veröffentlichungen sowohl als Artikel in der Fachpresse als auch in Form von nationalen und internationalen (peer reviewed) Tagungsbeiträgen und auf Messen darf aufgrund von nachfolgenden Korrespondenzen mit Fachkollegen als gut bis sehr gut bezeichnet werden.

## 5.2 Veröffentlichungen

Die Forschungs- und Arbeitsergebnisse des Instituts ifak im Projekt UR:BAN wurden von den wissenschaftlichen Mitarbeitern auf Kongressen, Tagungen und Messen sowie der Fachpresse vorgestellt. Im Folgenden sind einige der wichtigsten wissenschaftlichen Beiträge zu den Themengebieten mit direktem Bezug zum Vorhaben UR:BAN aufgelistet:

### 5.2.1 Konferenzen

**Ruß, T.; Krause, J.; Schönrock, R.:** Automated testing of V2X-based applications for cooperative traffic systems. 23rd World Congress on Intelligent Transport Systems, 10.-14.10.2016, Melbourne, Australien, 2016

**Ruß, T.; Krause, J.; Schönrock, R.:** V2X-based cooperative protection system for vulnerable road users, impact on traffic. 23rd World Congress on Intelligent Transport Systems, 10.-14.10.2016, Melbourne, Australien, 2016

**Schönrock, R.; Ruß, T.; Krause, J.:** Intelligenter Leitkegel als Beispiel einer prototypischen Car2X-Applikation. 1. Deutscher C2X-Kongress, 01.-02.03.2016, Frankfurt am Main, ITS Germany e.V., 2016.

**Ruß, T.; Krause, J.:** Standardbasiertes Framework zum Testen hochverteilter Car2X-Applikationen. 7. GMA-Fachtagung - Automotive meets Electronics (AmE), 01.-02.03.2016, Dortmund, 2016.

**Ruß, T.:** Simulationsgestütztes Testen kooperativer, verteilter Verkehrssysteme. UR:BAN-Konferenz, 18.-19.02.2016, Garching, TU München, 2016.

**Schönrock, R.; Wolf, F.; Ruß, T.:** Smart Traffic Cone - Dynamic detection and localization of traffic disruptions. FastZero15: Future Active Safety Technology Towards Zero Traffic Accidents Symposium, 09.-11.09.2015, Gothenborg, Sweden, 2015.

**Ruß, T.; Naumann, S.:** Avoiding collisions between pedestrians/cyclists and vehicles at signal controlled intersections using V2X. FastZero15: Future Active Safety Technology Towards Zero Traffic Accidents Symposium, 09.-11.09.2015, Gothenborg, Sweden, 2015.

**Schade, J.; Czogalla, O.:** Routing services in consideration of traffic condition using data from the Mobility Data Marketplace. 22nd World Congress on Intelligent Transport Systems, 05.-09.10.2015, Bordeaux, France, 2015.

**Ruß, T.; Meier, M.; Krause, J.:** Neuartige Diagnosemethode für Netzwerke der Smart City. VDE-Kongress 2014 – Smart Cities - Intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft, 20.-21.10.2014, Frankfurt, VDE, 2014

**Ruß, T.; Krause, J.; Wolf, F.:** Diagnose und Konformitätsprüfung der Car2X Kommunikation zum Testen verteilter Car2X Applikationen. 5. GMA-Fachtagung - Automotive meets Electronics (AmE), 18.-19.02.2014, Dortmund, 2014



**Schönrock, R.; Krause, J.; Czogalla, O.; Herrmann, A.:** Kooperative Schutzeinrichtung (KSE) Dynamische Erfassung und Verortung von Verkehrsstörungen. POSNAV ITS Konferenz, 28.-29.11.2013, Berlin, 2013.

### 5.2.2 Fachzeitschriften

**Schade, J.; Schönrock, R.:** Intelligent management of traffic congestion. Internationales Verkehrswesen 68(Special Edition 1 International Transportation), 2016

**Krause, J.; Schönrock, R.:** Verkehrsbehinderungen intelligent managen. Internationales Verkehrswesen 67(4):74-75, 2015

**Krause, J.; Schönrock, R.; Schade, J.:** Institut für Automation und Kommunikation entwickelt Intelligenten Leitkegel pvt POLIZEI VERKEHR + TECHNIK - Fach- und Führungszeitschrift für Polizei- und Verkehrsmanagement, Technik und Ausstattung, 1/2016

### 5.2.3 Messen

Konkrete Ergebnisse aus den UR:BAN-VV-Projektresultaten des ifak wurden auf verschiedenen Messen präsentiert. Ziel dieser Maßnahmen ist die Erweiterung des wissenschaftlichen und industriellen Netzwerkes.

#### **CeBIT 2016:**

Ausstellung des Intelligenten Leitkegels auf dem Gemeinschaftsstand der Investitions- und Marketinggesellschaft Sachsen-Anhalt auf der CeBIT 2016, vom 14.-19.03.2016 in Hannover

#### **GPEC 2016:**

Ausstellung der KSE und des Intelligenten Leitkegels auf der General Police Equipment Exhibition & Conference (GPEC) 2016, 9. Internationale Fachmesse und Konferenz für Polizei- und Spezialausrüstung vom 07.-09.06.2016 in Leipzig

#### **ConCarExpo 2016:**

Das ifak beteiligte sich zum ersten Mal auf der ConCarExpo 2016 (siehe Abbildung 71) vom 29. - 30.06.2016 in Düsseldorf und präsentierte dort den *CoSys Test Creator*, ein direktes Ergebnis der Projektarbeiten aus dem Teilprojekt KI in UR:BAN VV. Beim *CoSys Test Creator* handelt es sich um ein Werkzeug zum Testen verteilter, kooperativer Systeme und vernetzter Mobilitätsapplikationen.



Abbildung 71: Messestand des ifak auf der ConCarExpo 2016 in Düsseldorf

### 5.3 Gebrauchsmusteranmeldung für den Intelligenten Leitkegel

Um die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse zur Kooperativen Schutteinrichtung in Form von Lizenzentnahmen besser und gesichert verwerten zu können, wurde am 30.05.2014 unter dem amtlichen Aktenzeichen DE 20 2014 004 569.0 ein Gebrauchsmuster für den Intelligenten Leitkegel angemeldet. Diese Gebrauchsmuster wurde am 11.08.2014 bewilligt und eingetragen.

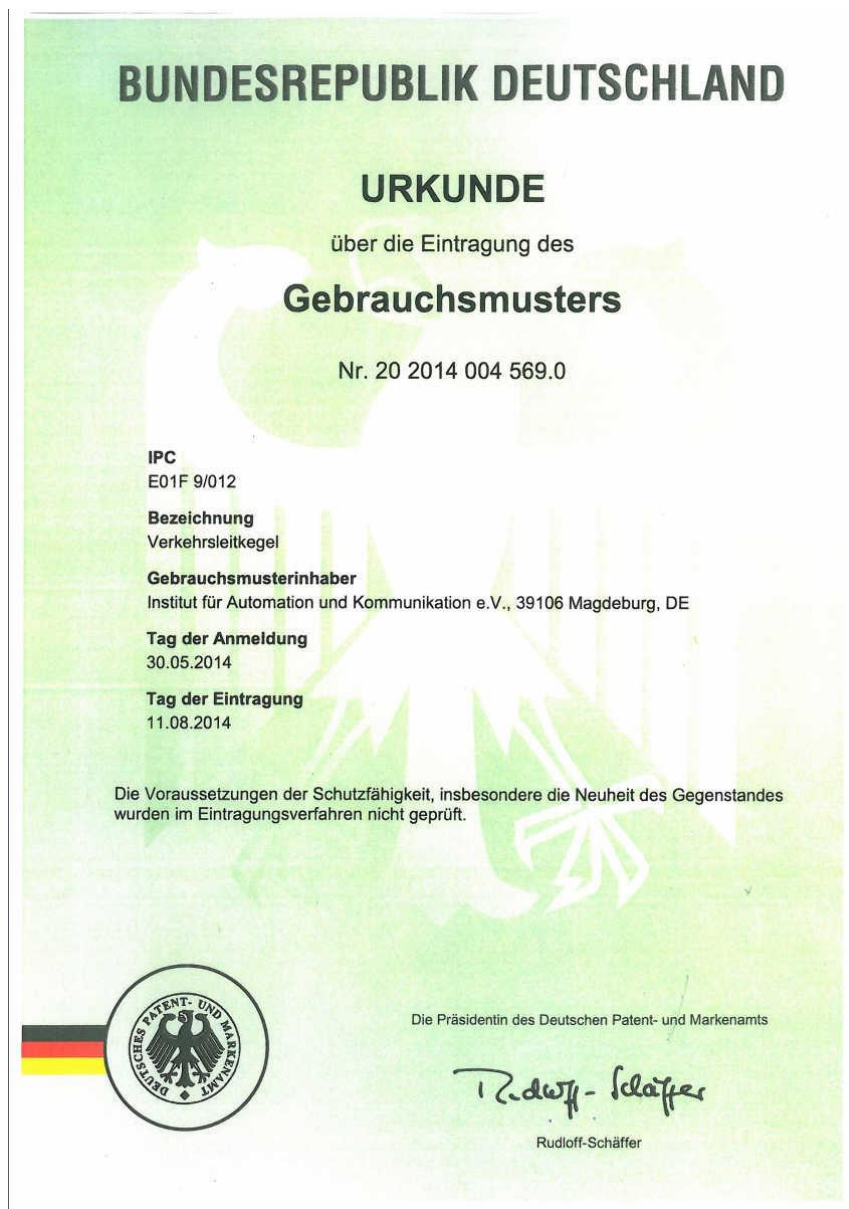


Abbildung 72: Gebrauchsmuster für das UR:BAN-Resultat Kooperative Schutteinrichtung (KSE)

## 6 Anhang

### 6.1 Abkürzungsverzeichnis

AIM	Anwendungsplattform Intelligente Mobilität
ASD	Application Spezific Data
API	Application Programmers Interface
AU	Application Unit
CAD	Computer Aided Desing
CAM	Cooperative Awareness Message
CCU	Communication And Control Unit
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DSRC	Dedicated Short Range Communication
GIS	Geografisches Informationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
ITC	Intelligent Traffic Cone
JSON	JavaScript Object Notation
KSE	Kooperative Schutzeinrichtung
M2M	Machine to Machine
MAC	Media Access Control
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NMEA	National Marine Electronics Association
OSM	Open Street Map
PCB	Printed Circuit Board
PDR	Pedestrian Dead Reckoning
PPP	Precision Point Positioning
RSE	Radfahrer-Schutzeinrichtung
RSU	Road Side Unit
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services

---

RTK	Real Time Kinematic
SIM	Subscriber Identity Module
SOC	System On Chip
SQL	Structured Query Language
TTCN-3	Testing and Test Control Notation
TEC	Traffic Event Compact
TPEG	Transport Protocol Experts Group
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VPN	Virtual Privat Network
WGS 84	World Geodetic System 1984
WiFi	Wireless Fidelity synonym für WLAN
WLAN	Wireless Local Area Network
WPC	Wireless Power Consortium
WWW	World Wide Web

## 6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Optimierungsziele und Komponenten im TP Smarte Kreuzung .....	6
Abbildung 2: „Kooperative Infrastruktur“ .....	6
Abbildung 3: Einbettung des TP „Kooperative Infrastruktur“ in UR:BAN-VV .....	14
Abbildung 4: Projektstruktur „Kooperative Infrastruktur“ .....	15
Abbildung 5: Verwendung des MDM in UR:BAN VV .....	16
Abbildung 6: Rechtsabbiegendes KFZ gefährdet Radfahrer und durch Schutzeinrichtung angedachte Lösung .....	20
Abbildung 7: Tool-Ketten, um Qt-App für verschiedene mobile Plattformen zu entwickeln .....	22
Abbildung 8: Am Fahrradlenker befestigtes Smartphone warnt vor schneidendem Fahrzeug .....	23
Abbildung 9: Bewegung vom Smartphone-Beschleunigungssensor (blau) und extrahierte Sinusfunktion (rot) zur Schrittzahl- und damit Geschwindigkeitsmessung von Fußgängern .....	24
Abbildung 10: Application Unit der RSU .....	28
Abbildung 11: Test der WLAN-Reichweite (2,4 GHz) bei bestehender Verbindung zum Access Point (links) sowie dem erstmaligen Verbinden bei Annäherung (rechts) .....	29
Abbildung 12: Verwaltung von mehreren Programmen durch einen Dominion-Server des DLR .....	30
Abbildung 13: Schematische Darstellung von Architektur und Schnittstellen aller in Sk-34 bearbeiteten Funktionen im Bereich einer Kreuzung: (1) Erkennung und Warnung von KFZ über 11p, (2) Erkennen und Warnen schw. Verkehrsteilnehmer über WLAN, (3) Erkennen schw. VT über Radar .....	31
Abbildung 14: Sichtfeld der UMRR-Radarsensoren im Testfeld Braunschweig (K47) .....	33
Abbildung 15: Lokales Sensorkoordinatensystem (links) sowie für eine Kreuzung einheitliches Referenz-Koordinatensystem (rechts) .....	34
Abbildung 16: Zusätzlich zu Funk-Positionen (rot) kann Radar Verkehrsteilnehmer erkennen (grün-weiß) .....	35
Abbildung 17: Durch Rückstau müssen KFZ erst anfahren, sodass sich die TTC vergrößert .....	37
Abbildung 18: Leitkegel-Ladeschale, Leitkegel (SK35) und Wavebee auf Gestell .....	40
Abbildung 19: Smartphone und Tablet im Demo-Fahrzeug zur Visualisierung der RSE-Warnungen ...	41
Abbildung 20: Über Datenbrille sichtbare Warnung in interaktiver Simulation .....	43
Abbildung 21: Auswertung der Nutzerbefragung zu beliebtester (1. Wahl) bis unbeliebtester (7. Wahl) Variante zur Warnung vor Fahrzeugen, die einen als Radfahrer an Kreuzungen gefährden .....	44
Abbildung 22: Befragung über Bereitschaft, zwecks Verkehrssicherheit persönliche Daten preiszugeben .....	45
Abbildung 23: In VISSIM für die Radfahrer-Schutzeinrichtung durchgeführte Verkehrssimulation .....	46
Abbildung 24: Verteilung der mittleren Post-Enchroachment Time ( $PET_{mean}$ ) und der mittleren Time-to-Collision ( $TTC_{mean}$ ) für Zufahrtstyp 1 .....	48

Abbildung 25: Geschwindigkeitsverlauf (lokale Geschw.) für die Annäherung an den Knotenpunkt mit Zufahrtstyp 2 unter Einfluss der RSE .....	49
Abbildung 26: Systemkomponenten der KSE.....	58
Abbildung 27: Schnittstellen und Kommunikationsschema der KSE, wie es im Forschungsvorhaben in den Prüf- und Testfeldern realisiert wurde.....	59
Abbildung 28: Grobkonzept des Intelligenten Leitkegels .....	62
Abbildung 29: Blockdiagramm der IL-internen Komponenten. ....	64
Abbildung 30: Prototyp des Intelligenten Leitkegels mit integrierter Elektronik .....	65
Abbildung 31: erstellte CAD-Zeichnung des verwendeten Leitkegels als Grundlage für die Planung der Komponentenintegration und für die Durchführung und Unterstützung der mechanischen Fertigung .....	66
Abbildung 32: mechanische Fertigung der IL-Prototypen in der Werkstatt des ifak (links - Fräsen der Fußplatte in spezieller Spannvorrichtung, rechts – IL Prototyp, gefräste Fußplatte und IL mit integrierter Elektronik).....	67
Abbildung 33: kontaktlose Ladestation des IL in Ober- und Unteransicht mit vergossener Primärelektronik und Kfz-Bordnetzstecker für die Integration in die Einsatzfahrzeuge .....	68
Abbildung 34: schematische Darstellen des für den IL verwendeten Qi-Standards.....	69
Abbildung 35: primäre Ladeelektronik der kontaktlosen Ladestation mit Sendespule und Ferit-Material .....	69
Abbildung 36: sekundärseitige (empfangsseitige) Ladeplatine des Intelligenten Leitkegels in Vorder- und Rückansicht mit Akku und Empfängerspule und weiteren elektronischen Bauteilen für die kontaktlose Energieübertragung.....	70
Abbildung 37: Komponenten und Applikationen des Leitkegel-Servers.....	71
Abbildung 38: Kreuzungstopologie an der K047 im Prüffeld Braunschweig als Datengrundlage für das SK- und Fahrstreifen-Matching der KSE .....	75
Abbildung 39: Leitkegel-Server generiert Störstelleninformation durch Kombination mehrerer Intelligenter Leitkegel.....	77
Abbildung 40: KSE-Demo-Webseite mit TOPO und IL an der K047 im Prüffeld Braunschweig als OSM-Layer .....	80
Abbildung 41: Datenbereitstellung Intelligenter Leitkegel im MDM.....	82
Abbildung 42: ifak Test-RSU/AU mit verschiedenen Antennen .....	83
Abbildung 43: DENM der KSE, empfangen und angezeigt im Test- und Debug-HMI des Projektpartners VW (Zufahrt Hagenring aus Richtung Süden) mit korrektem Spurmatching .....	87
Abbildung 44: Anzeige des KSE-Warnung im HMI des VW-Versuchsfahrzug (Kreuzungslotze) während der UR:BAN-Abschlussdemonstration an der Messekreuzung in Düsseldorf.....	87
Abbildung 45: Konfiguration der Intelligenten Leitkegel per Bluetooth, mit der Android-App auf einem SAMSUNG-Tablet .....	88
Abbildung 46: GNSS-Module für den IL, u-blox NEO-M8N und NVS-Technologies NVS08CSM .....	93

Abbildung 47: entwickelte universelle GNSS-Adapter-Platine und Gehäuseintegration ..... 94

Abbildung 48: Positionierung des Leitkegels in der Zufahrt Rebenring aus Richtung Westen an der K-047 im Prüffeld Braunschweig (gelb: Echtzeit-Position, berechnet im Leitkegel mit dem PPP-Verfahren; blau: Position im Postprocessing-Verfahren, basieren auf RAW- und Korrekturdaten) .. 100

Abbildung 49: Zeitverhalten der Positionierung des IL auf dem Rebenring (westliche Zufahrt) mit dem PPP-Verfahren ..... 102

Abbildung 50: PPP-Positionslösungen des IL im Postprocessing-Verfahren im Galileo-Testfeld Magdeburg (Messpunkt 21) ..... 103

Abbildung 51: IL-Positionslösung im Realtime-PPP-Verfahren mit SBAS Korrekturen (Galileo-Testfeld Magdeburg, Messpunkt 21) ..... 104

Abbildung 52: IL-Positionslösung im Realtime-PPP-Verfahren mit SBAS Korrekturen (Testkreuzung Oberbilker-Markt in Düsseldorf) ..... 104

Abbildung 53: Einsatz des Intelligenten Leitkegels während der Funktionstests im Prüffeld Braunschweig, Zufahrt zur Forschungskreuzung K047 unter Ausnutzung einer aktuellen Baustellensituation..... 106

Abbildung 54: Einsatz des Intelligenten Leitkegels während der Integrationstests im Prüffeld Braunschweig, Zufahrt zur Forschungskreuzung K047 unter Ausnutzung einer aktuellen Baustellensituation..... 107

Abbildung 55: erfolgreicher Einsatz der KSE und des IL bei den Transfertests im Testfeld Düsseldorf. Positionierung zweier IL am Oberbilker Markt, Kreuzungsausfahrt Kölner Str., Richtung Norden .... 108

Abbildung 56: Freifläche des Galileo Testfelds Magdeburg mit ausgewählten Messpunkten (MP) und Prototyp des IL (ohne Kegelkonus) auf dem Messpunkt MP19 ..... 108

Abbildung 57: Modellierung der Fahrstreifenwechselbereiche in der Störstellenzufahrt ..... 113

Abbildung 58: Einfluss der SK-35-Applikation auf den Geschwindigkeitsverlauf (lokale Geschwindigkeit) für die Annäherung an den Knotenpunkt mit Zufahrtstyp 5 bei hoher Verkehrsbelastung (16-17 Uhr) und Sperrung des rechten Fahrstreifens ..... 114

Abbildung 59: Grundlegender Aufbau des Verkehrsnetzes die SUMO-Simulation der KSE ..... 116

Abbildung 60: iCone Verkehrssensor für Baustellenoperationen und Verkehrs-Monitoring aus [33]120

Abbildung 61: Intellicone des Herstellers Highway Resource Solutions Limited in verschiedenen Varianten aus [35], © 2015 by Highway Resource Solutions Limited..... 121

Abbildung 62: Eigenschaften und Anwendung des Intellicone-Systems aus [36]; © 2016 Trans Canada Traffic Inc. .... 122

Abbildung 63: Lösungsansatzes für ein komplexes Ökosystem eines integrierten Sicherheitsmanagement für den Straßenverkehr ..... 126

Abbildung 64: Struktur eines verteilten Testsystems zum Testen eines kooperativen Verkehrssystems ..... 129

Abbildung 65: Ablauf beim Erzeugen von Testdaten zur SUT-Stimulation ..... 131

Abbildung 66: Deklarationssprache zur Beschreibung von Simulationsszenarien ..... 132



---

Abbildung 67: Übersicht der zu testenden Radfahrerschutz-Applikation (mit Grafiken aus [12]) .....	135
Abbildung 68: Testsystem-Demonstrator auf der UR:BAN-Abschlussdemo .....	136
Abbildung 69: Darstellung des mitgeschnittenen Netzwerkverkehrs als Sequenzdiagramm .....	137
Abbildung 70: Fundamentaler Testprozess nach ISTQB (ebd.) .....	139
Abbildung 71: Messestand des ifak auf der ConCarExpo 2016 in Düsseldorf .....	146
Abbildung 72: Gebrauchsmuster für das UR:BAN-Resultat Kooperative Schutzeinrichtung (KSE)....	147

### 6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schnittstellen der KSE an der RSU der Smarten Kreuzung .....	60
Tabelle 2: Parameter für die IL-Konfiguration nach dem TPEG-TEC-Standard .....	90
Tabelle 3: Änderung der Reisezeit mit KSE-Informationen (zweite Szenario) für unterschiedliche Ausstattungsraten .....	118

## 6.4 Literaturverzeichnis

- [1] „Mobilitäts Daten Marktplatz,“ [Online]. Available: <http://www.mdm-portal.de/>. [Zugriff am 15.6.2015].
- [2] „DATEX II Website,“ 2006. [Online]. Available: <http://www.datex2.eu>.
- [3] *RTKLIB: An Open Source Program Package for RTK-GPS*, Online Available: <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>.
- [4] „Spezifikation der Kommunikationsprotokolle. öffentliches Deliverable D21.4,“ simTD Consortium, 2009.
- [5] „TPEG TEC Application Specification, Version 1.0,“ 09.03.2006.
- [6] ETSI, „Testing and Test Control Notation (TTCN) - 3,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.ttcn-3.org/>.
- [7] European Telecommunications Standards Institute, „Intelligent Transport Systems (ITS) - Vehicular Communications - Basic Set of Applications - Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service,“ März 2011. [Online]. Available: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102600\\_102699/10263702/01.02.01\\_60/ts\\_10263702v010201p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263702/01.02.01_60/ts_10263702v010201p.pdf). [Zugriff am 10. August 2016].
- [8] O. Bley, R. Kutzner, B. Friedrich und T. Schuler, „Improvement in traffic state estimation at signal controlled intersections by merging induction loop data with v2x data,“ in *Archives of Transport*, 5(3):3-7, 2012.
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV), *Richtlinien für Lichtsignalanlagen–RiLSA*, 1992.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV), *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (hbs)*, Köln: FGSV, 2001.
- [11] M. Torsten, „Konzeption und Durchführung interaktiver Simulationen zur Eignungsanalyse von Warnausgaben für den Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer am Beispiel von Radfahrern,“ Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme, Magdeburg, 2015.
- [12] XCYCLE-Konsortium, „XCYLE-Website,“ 2015. [Online]. Available:

- <http://www.xcycle-h2020.eu/>. [Zugriff am 11 August 2016].
- [13] S. Bundesamt, „Baustellenunfälle, Statistiken Tabelle 9.2.,” ADAC e.V., Online Available:  
[https://www.adac.de/\\_mmm/pdf/statistik\\_9\\_2\\_Baustellenunfaelle\\_42880.pdf](https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_9_2_Baustellenunfaelle_42880.pdf), 2015.
- [14] „Car 2 Car Communication Consortium,” 2015. [Online]. Available: <http://www.car-to-car.org/>.
- [15] „Richtlinien für Streckenarbeiten (RSA-95),” [Online]. Available: <http://www.rsa-95.de>. [Zugriff am 09 07 2012].
- [16] D. Adam, „Technische Lieferbedingungen für Leitkegel (TL-Leitkegel),” TMS Pro Shop GmbH, [Online]. Available: [www.tl-leitkegel.de](http://www.tl-leitkegel.de). [Zugriff am 07 04 2016].
- [17] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen,” interactive instruments GmbH, [Online]. Available: <http://www.okstra.de/>. [Zugriff am 01 02 2015].
- [18] R. Schönrock, *Vorläufige Spezifikation und Dokumentation des Nachrichtenformates DENM für die Applikation SK35 – Kooperative Schutzeinrichtung (KSE)*, 2012.
- [19] M. Möckel, „Car2X Nachrichtenformate und Definitionen,” DLR, 2013.
- [20] NATIONAL GEOSPATIAL- Intelligence Agency, „Implementation Practice Web Mercator Map Projection, Version 1.0.0,” 18 02 2014. [Online]. Available: [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/web\\_mercator/\(U\)%20NGA\\_SIG\\_0011\\_1.0.0\\_WEBMERC.pdf](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/web_mercator/(U)%20NGA_SIG_0011_1.0.0_WEBMERC.pdf).
- [21] „Freie Weltkarte OpenStreetMap,” [Online]. Available: <http://www.openstreetmap.de>. [Zugriff am 07 03 2016].
- [22] „DATEX II User Guide. document version 2.2.,” Directorate General for Mobility and Transport, Online Available, 2013.
- [23] J. Schade, „Routing service in consideration of traffic situation with data from MDM.,” in *AmE 2015 – Automotive meets Electronics - Beiträge der 6. GMM-Fachtagung*, 2015.
- [24] Cohda Wireless, *CohdaMobility MK5 Module Datasheet. version: V1.0.0.*, OnlineAvailable: Cohda Wireless, 2014.

- [25] u-blox, *THEO-P1 series Host-based V2X transceiver module Data Sheet*, OnlineAvailable: u-blox, 2016.
- [26] „Übersichtsdarstellung der Nachrichtenprotokolle auf Basis simTD – ASN.1, Decentralized Environmental Notification(DEN),“ 2012.
- [27] „ISO/TS 18234-4, TECHNICAL SPECIFICATION, First edition,“ 1.06.2006.
- [28] W. Stempfhuber und M. Buchholz, *A PRECISE, LOW-COST RTK GNSS SYSTEM FOR UAV APPLICATIONS*, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland, 2011.
- [29] H. F. Piotraschke, *RTK für Arme - Hochpräzise GNSS-Anwendungen mit den kostengünstigsten Trägerphasen-Rohdatenempfängern*, Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V., 2013.
- [30] T. Takasu und A. Yasuda, *Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB*, International Symposium on GPS/GNSS, Jeju, 2009.
- [31] A. Hesselbarth, „GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP),“ *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 5 2009.
- [32] DLR, „SUMO-Simulation of Urban MObility,“ [Online]. Available: <http://sumo.sourceforge.net>.
- [33] iCone Products LLC, „About iCone,“ [Online]. Available: <http://iconeproducts.com/about-icone/>. [Zugriff am 07 06 2016].
- [34] iCone Products LLC, „iCone Specification Sheet,“ [Online]. Available: <http://iconeproducts.com/wp-content/uploads/2016/02/iConeSpecificationSheet-Oct2013.pdf>. [Zugriff am 04 05 2016].
- [35] Highway Resource Solutions Ltd, „intellicone,“ [Online]. Available: <http://www.intellicone.co.uk/>. [Zugriff am 07 04 2016].
- [36] Trans Canada Traffic Inc, „Intellicone Technology - FactFile,“ [Online]. Available: <http://www.transcanadatraffic.ca/Intellicone-Technology.html#.V6NckjU3mnc>. [Zugriff am 02 04 2016].
- [37] P. Ammann und J. Offutt, *Introduction to Software Testing*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.

- [38] O. Lemke, „Modellbasierte Anforderungsspezifikation sicherheitskritischer Systeme im Bahnbereich - Beschreibungsmittel und ihre Anwendung,“ 2010.
- [39] PTV, „PTV Vissim,“ [Online]. Available: <http://visiontraffic.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim/>.
- [40] A. Company, „Anylogic-Multimethod Simulation Software,“ [Online]. Available: <http://www.anylogic.com>.
- [41] T. Ruß, J. Krause und F. Wolf, „Diagnose und Konformitätsprüfung der Car2X Kommunikation,“ in *GMA-Fachtagung - Automotive meets Electronics (AmE)*, Dortmund, 2014.
- [42] European Commission, „Action Plan for the Deployment of Intelligent Transport Systems in Europe, COM(2008) 886,“ Brussels, 2008.
- [43] Directive of the European Parliament and Council, „Laying down the Framework for the Deployment of Intelligent Transport Systems in the Field of Road Transport and for Interfaces with Other Transport Modes, COM(2008) 887,“ Brussels, 2008.
- [44] „Technische Schnittstellenbeschreibung. version 2.3, S.15.,“ Mobilitäts Daten Marktplatz, OnlineAvailable, 2012.
- [45] N. Geoghegan, „Navit – Car navigation system with routing engine,“ [Online]. Available: <http://www.navit-project.org/>. [Zugriff am 07 06 2015].
- [46] *Technische Schnittstellenbeschreibung. version 2.4.1, S.15.,* OnlineAvailable: Mobilitäts Daten Marktplatz, 2015.
- [47] DLR, „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM),“ [Online]. Available: <http://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-6422/#gallery/25304>. [Zugriff am 15 06 2015].
- [48] J. Krause, S. Magnus und T. Ruß, „Simulationsgestütztes Testen kooperativer, verteilter Systeme,“ in *Komma 2015 - 6. Jahreskolloquium "Kommunikation in der Automation*, Magdeburg, 2015.
- [49] T. Ruß, M. Meier und J. Krause, „Neuartige Diagnosemethode für Netzwerke der Smart City,“ in *VDE-Kongress 2014 – Smart Cities - Intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft*, Frankfurt, 2014.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  UR:BAN: Urbaner Raum – Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement. Projektsäule VV: Vernetztes Verkehrssystem.	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Krause, Jan Ruß, Tim Schönrock, René	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015
	6. Veröffentlichungsdatum 12.08.2016
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Institut für Automation und Kommunikation e.V. Werner-Heisenbergstraße 1 39106 Magdeburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19 P 11007 I
	11. Seitenzahl 146
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 49
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 72
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Das Verbundprojekt UR:BAN verfolgte die Ziele, innovative Fahrerassistenz- und Verkehrsmanagementsysteme für urbane Räume zu entwickeln, zu testen und deren Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit und Effizienz zu bewerten. Innerhalb der Projektsäule Vernetztes Verkehrssystem war das ifak an den Teilprojekten „Smarte Kreuzung“ und „Kooperative Infrastruktur“ beteiligt. Arbeitsinhalte waren im Teilprojekt „Smarte Kreuzung“ die Applikationen Radfahrer-Schutzeinrichtung und Kooperative Schutzeinrichtung. Mit der Radfahrer-Schutzeinrichtung wurde dabei die Integration schwacher Verkehrsteilnehmer in kooperative ITS über Car2X-Kommunikation, Smartphones und eine Infrastrukturlösung untersucht und prototypisch umgesetzt. Kollisionen an Ampelkreuzungen können so vorhergesagt und betroffene Verkehrsteilnehmer gezielt gewarnt werden. Mit der Kooperativen Schutzeinrichtung werden Infrastrukturelemente mit Kommunikations- und (hochgenauer) Lokalisierungstechnik kostengünstig bereitgestellt, um auf dieser Basis ein effizientes Verkehrsstörungsmanagement zu ermöglichen. Im Teilprojekt Kooperative Infrastruktur entwickelte das ifak ein Testframework für das systematische und automatisierte Testen von verteilten, kooperativen Systemen und Car2X-Applikationen.	
19. Schlagwörter Car2X-Kommunikation; Schutz schwacher Verkehrsteilnehmer; Testen verteilter, kooperativer Systeme und Car2X-Applikationen; hochgenaue Lokalisierung; Management von Verkehrsstörungen	
20. Verlag -	21. Preis -

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. Type of Report Final report
3. Titel  UR:BAN: Urban Space - User oriented assistance systems and network management. Subproject: Networked Traffic System.	
4. Author(s) (Family, First Name(s))  Krause, Jan Ruß, Tim Schönrock, René	5. End of Project 2015-12-31
	6. Publication Date 2016-08-12
	7. Type of Publication Report
8. Performing Organization(s) (Name, Address)  Institut für Automation und Kommunikation e.V. Werner-Heisenberg-Straße 1 39106 Magdeburg Germany	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 19 P 11007 I
	11. No. of Pages 146
12. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn Germany	13. No. of References 49
	14. No. of Tables 3
	15. No. of Figures 72
16. Supplementary Notes -	
17. Presented at (Title, Place, Date) -	
18. Abstract  The joint project UR:BAN had the aim to develop and test innovative driver assistance and traffic management systems for urban areas and to evaluate their contribution to the improvement of safety and efficiency. Within the major subproject Networked Traffic System, ifak was involved in the minor subprojects "Smart Intersection" and "Cooperative Infrastructure". Work contents of "Smart Intersection" were the applications "Cyclist Protection System" and "Cooperative Protection System". For the cyclist protection, the integration of vulnerable road users into cooperative ITS via V2X communication, smartphones and an infrastructure solution was investigated and prototypically implemented. Collisions at signal controlled intersections can be predicted and effected road users can be specifically warned. With the "Cooperative Protection System", infrastructure elements with communication and (high precision) localization technology are provided to enable an efficient management of traffic congestions. Within the subproject "Cooperative Infrastructure", ifak developed a test framework for systematic und automated testing of distributed, cooperative systems and V2X applications.	
19. Keywords V2X communication; protection of vulnerable road users; test of distributed, cooperative systems and V2X applications; high precision localization; management of traffic congestions	
20. Publisher -	21. Price -