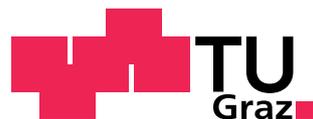


Masterarbeit

Implementierung und Evaluierung von C2X-Applikationen im Rahmen von simTD

Marco Steger

Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung
Technische Universität Graz
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Brasseur



Begutachter: Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Daniel Watzenig

Graz, im September 2013

Kurzfassung

Die drahtlose Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit Infrastruktur-Komponenten kann für die Verkehrssicherheit einen revolutionären Schritt, vergleichbar mit der Einführung von ABS-Systemen, bedeuten. Um das Potenzial und auch mögliche Einschränkungen dieser Technologie besser einschätzen zu können, werden derzeit weltweit Feldversuche und Forschungsprojekte durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich einerseits mit der Evaluierung von „Car-to-Car“- bzw. „Car-to-Infrastructure“-Funktionen und andererseits mit der Implementierung eines Kreuzungsassistenzsystems.

Bei den evaluierten Funktionen handelt es sich zum einen um ein Verkehrszeichen-Assistenz-System, das den Fahrer über die aktuell geltenden Verkehrsregeln (Tempolimit, Überholverbot) informiert bzw. bei Nichtbeachtung dieser Regeln auch akustische und visuelle Warnungen generiert. Zum anderen wurde ein Querverkehr-Assistenz-System untersucht, das den Fahrer im Bereich von Kreuzungen unterstützt bzw. vor kritischen Verkehrssituationen warnt. Beide Funktionen wurden im Zuge des simTD-Projektes, des bislang größten Feldtest Europas im Bereich Verkehrstelematik, implementiert und im realen Straßenverkehr getestet. Die daraus erhaltenen Daten wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit entsprechend aufbereitet und als Basis für die Evaluierung der Funktionen herangezogen.

Das implementierte Kreuzungsassistenzsystem basiert auf Daten, die via „Car-to-Car“-Kommunikation empfangen und im Anschluss zur Detektion von potentiell kritischen Situationen im Bereich von Kreuzungen herangezogen werden können. Außerdem stellt es eine Low-Cost-Variante des simTD Querverkehr-Assistenz-Systems dar. Für die entwickelte Funktion muss keine aufwendige Beschreibung der Kreuzungstopologie (Spurführung, Kollisionsbereiche) im Fahrzeug gespeichert oder via drahtloser Kommunikation empfangen werden. Es wird rein auf Basis der Positionsdaten und der Fahrzeugparameter der in der Nähe befindlichen Fahrzeuge eine Trajektorienprädiktion durchgeführt und bei Bedarf eine Warnung generiert. Zusätzlich wurden Methoden entwickelt, um fehlerhafte Vorhersagen frühzeitig zu erkennen und daraus resultierende Warnungen zu unterdrücken.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass das implementierte Kreuzungsassistenzsystem durchaus als informierende „Car-to-Car“-Funktion im Fahrzeug integriert werden kann. Für einen aktiven Eingriff (z.B.: aktives Bremsen) ist das System aufgrund von fehlenden Zusatzdaten und daraus resultierenden Unsicherheiten derzeit allerdings nicht geeignet.

Abstract

The wireless interconnection between vehicles amongst themselves and also between vehicles and infrastructural components can be a revolutionary step with regards to traffic safety, comparable to the introduction of ABS systems. Currently several field tests and research projects are in progress all over the world in order to estimate the potential and also the limitations of this technology.

In the present work an evaluation of a car to car (C2C) as well as a car to infrastructure (C2I) function is performed. Furthermore, the implementation of a crossroad assistance system is presented.

The C2I function is a traffic sign assistance system, which informs the driver about the effective traffic rules (speed limit, no overtaking). This system creates an acoustic and visual warning, if the driver ignores these rules. The C2C function is a cross traffic assistance system, which supports the driver in crossroads areas. If this system detects a critical traffic situation, it creates a corresponding warning. Both functions were implemented as part of the simTD project. SimTD is the biggest field test in the area of traffic telematics in Europe so far and the related C2I and C2C functions are tested under real road traffic conditions. In the present work the data, gathered from the simTD field test, is preprocessed and afterwards used for the evaluation of the two functions mentioned above.

The implemented crossroad assistance system is based on data, which is received by C2C communication. Subsequently, this data is used to detect critical traffic situations in crossroad areas. In contrast to the simTD cross traffic assistance system the developed function copes without a costly description of the crossroad topology like lanes or collision regions. The implemented system computes the trajectories for all vehicles in the immediate vicinity, based on their vehicle parameters and position data. If necessary, the driver will be warned by the function. In addition, several methods to detect faulty predictions and to suppress the resulting warnings were implemented.

The results of the present work clearly point out that it is conceivable that the implemented system is integrated into a vehicle as an informing C2C function. However, as a result of missing additional information (crossroads topology) and the resulting uncertainties, the system is currently unsuitable for direct interventions (e.g. active braking system).

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde im (Studien)Jahr am Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung an der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Ich möchte hiermit allen, die mich im Zuge dieser Arbeit unterstützt und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei allen EG340ern, die mich so herzlich in ihr Team aufgenommen und mir ein professionelles wie angenehmes Arbeitsumfeld für den praktischen Teil meines Projektes geboten haben. Danken möchte ich dabei im Speziellen Dipl.-Ing. Christian Gruber, der mir ermöglicht hat, vor Ort in seinem Team mitzuarbeiten und einige bürokratische Hürden für mich aus dem Weg geräumt hat, sowie Dr.-Ing. Markus Bauer und Dr.-Ing. Daniel Schwarz, die mich während meines gesamten Projektes immer wieder mit guten Ratschlägen und neuen Ideen unterstützt und gefördert haben. Bedanken möchte ich mich auch bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Univ.-Doz. Daniel Watzenig, der mir die Chance, diese tolle Diplomarbeit durchführen zu können, ermöglicht und mich während der gesamten Projektlaufzeit immer tatkräftig unterstützt hat. Ebenso möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dr. Michael Karner bedanken, der mir immer wieder vor allem beim organisatorischen Anteil an meiner Arbeit unter die Arme gegriffen hat. Danken möchte ich auch Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Werner Rom, der mir während der Erstellung dieses Dokuments mit zahlreichen Verbesserungsvorschlägen und Ratschlägen zur Hand gegangen ist.

Abschließend möchte ich mich noch bei meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung bedanken!

Ohne eure Hilfe wäre es nicht möglich gewesen! Vielen Dank!

Graz, im Juli 2013

Marco Steger

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	State of the Art	11
1.1.1	C2X-Feldversuche weltweit	12
1.2	Motivation	12
1.3	Aufgabenstellung	13
1.3.1	simTD: Verkehrszeichenassistentz (VZA) - Kapitel 2	13
1.3.2	simTD: Querverkehrsassistentz (QVA) - Kapitel 3	13
1.3.3	Implementierung eines Kreuzungsassistentzsystems mit beschränkten Eingangsdaten - Kapitel 4	14
1.4	Gliederung	14
1.5	Sichere Intelligente Mobilität: Testfeld Deutschland - simTD	14
1.5.1	Motivation zum simTD-Projekt	14
1.5.2	Allgemeine Informationen	15
1.5.3	Technische Beschreibung des simTD-Systems	18
1.5.4	Aufbereitung der Logdaten	21
1.6	Technische Voraussetzungen	23
1.6.1	GPS	23
1.6.2	IEEE 802.11p	24
2	Verkehrszeichen-Assistentz (VZA) in simTD	25
2.1	Funktionsbeschreibung	26
2.1.1	Berücksichtigte Verkehrszeichentypen	26
2.1.2	VZA Betriebsmodi	27
2.1.3	Effektives Fahrerverhalten	27
2.2	simTD: Technische Umsetzung	27
2.2.1	Komponenten Diagramm	27
2.2.2	Die Gesamtstruktur	29
2.2.3	VZA-Algorithmus und zugehöriger Funktionskern	30
2.2.4	Anzeige der Verkehrszeichen im Fahrzeug	32
2.3	simTD-VZA: Versuchsdurchführung und Logdaten	32
2.3.1	Versuchsdurchführung	32
2.3.2	Filterung der Logdaten	34
2.4	Vorauswertung	34
2.5	Hauptauswertung der Logdaten	36
2.5.1	Ausgangsdaten	37

2.5.2	Darstellung der Anfahrten via Boxplots	37
2.5.3	Gegenüberstellung der Anfahrten via Normplot	38
2.5.4	Abweichung von der Normkurve	38
2.5.5	Vergleich der Versuchsgruppen	39
2.5.6	Zeitlicher und Räumlicher Abstand zum Verkehrszeichen	40
2.5.7	Langstrecke: Vergleich zwischen den Versuchsgruppen	42
2.5.8	Die Update-Rate der IVS-VZ-Datenbank	42
2.5.9	Die VZA-Arbeitsmodi im Vergleich	43
2.5.10	Interpretation der Ergebnisse	43
3	Querverkehr-Assistenz in simTD	46
3.1	Funktionsbeschreibung	46
3.1.1	GPS-Positionsgenauigkeit	47
3.1.2	Beschreibung der Kreuzung mittels Kollisionsbereichen	48
3.2	Beschreibung der Testumgebung	48
3.2.1	Testgelände Friedberg	48
3.2.2	Verkehrsführung und Testablauf	49
3.3	Der QVA-Warnalgorithmus	50
3.3.1	Die Kollisionsbereichsauswertung	50
3.3.2	Prädiktion der Zeiten zum Kollisionsbereich	51
3.3.3	Der Kollisionsindikator	51
3.3.4	Warnlevel und Warnentscheidung	52
3.4	QVA-Logdaten	52
3.5	Automatisierte Analyse von Kreuzungs-Situationen	52
3.5.1	Verwendetes Auswerte-Template	52
3.5.2	Identifikation der betroffenen Kreuzung	52
3.5.3	Fahrtrichtung der Fahrzeuge bei Eintritt und Verlassen des Kreuzungsbereiches	55
3.5.4	Berechnung der fehlenden Parameter	55
3.6	Zusammenfassung	56
4	Implementierung eines Kreuzungsassistenzsystems	57
4.1	State-of-the-art und technische Voraussetzungen	57
4.1.1	Relative Positionierung	57
4.1.2	Trajektorienprädiktion	58
4.1.3	Koordinatensysteme und Darstellung	63
4.1.4	GIDAS-Daten	66
4.2	Der Warnalgorithmus	69
4.2.1	Blockdiagramm des Warnalgorithmus	69
4.2.2	Die Trajektorienprädiktion	71
4.2.3	Implementierte Bewertungsstufen	76
4.3	Validierung des Warnalgorithmus auf Basis von simTD-Daten	78
4.3.1	Die verwendeten Testdaten	78
4.3.2	Auswirkung der einzelnen Filterstufen	79
4.3.3	Auswirkung von verschiedenen Ego-Geschwindigkeitsmodellen	79
4.3.4	Verschiebung der Warnschwelle durch Variation der TTA	80

4.3.5	Variation der Safeparams	80
4.3.6	Auswirkung auf die Warnzeitpunkte	81
4.3.7	TTC für verschiedene Algorithmus-Generationen	81
4.3.8	Diskussion der Ergebnisse	81
4.3.9	Vergleich mit der simTD-Funktion QVA	83
5	Schlussbemerkungen und Ausblick	84
5.1	Schlussbemerkungen	84
5.2	Ausblick	85
A	Abkürzungsverzeichnis	86
B	VZA - Ergänzungen	88
B.1	VZA-Plots: idealisierte Anfahrten	88
B.2	VZA-Plots: Arbeitsmodi „ohne Warnung“	89
B.3	VZA-Plots: Arbeitsmodi „mit Warnung“	89
C	USA-Algorithmus - Ergänzungen	95
C.1	Zusätzliche GIDAS-Plots	95
	Literaturverzeichnis	98

Abbildungsverzeichnis

1.1	Umgesetzte C2X-Applikationen im simTD-Projekt [sK13]	17
1.2	Übersicht über das simTD-Testfeld [sK13]	19
1.3	simTD - big picture [sK13]	20
1.4	Überblick über das simTD-Gesamtsystem [SBB09]	21
1.5	Aufbereitung der simTD-Rohdaten	22
2.1	Vergleich: Idealer Verlauf mit VZA und durchschnittlicher Verlauf.	28
2.2	VZA-Komponentendiagramm	28
2.3	Übertragungswege zwischen den Komponenten	29
2.4	Ablaufdiagramm des VZA-Algorithmus	31
2.5	Beispiele für eine HMI-Anzeige	32
2.6	Die VZA-Teststrecke	33
2.7	Kartenausschnitt: Ausgewertetes Verkehrszeichen	35
2.8	Geschwindigkeitsverläufe für beide Gruppen	35
2.9	Plot der Mittelwerte und Standardabweichungen bzw. der Mediane	36
2.10	Boxplot der Geschwindigkeitsverläufe im Bereich VZ für beide Versuchsgruppen	38
2.11	Gegenüberstellung der beiden Gruppen via Normplot.	39
2.12	VZA-Auswertung: Vergleich der beiden Versuchsgruppen	40
2.13	VZA-Auswertung: räumlicher und zeitlicher Abstand zum VZ	41
2.14	Vergleich der beiden Versuchsgruppen über eine ca. 30 km lange Strecke	42
2.15	Gemittelte Geschwindigkeitsverläufe an verschiedenen VZ: Die Arbeitsmodi im Vergleich	44
2.16	Aufnahme aus der Sicht eines simTD-Fahrers.	45
3.1	Positionsgenauigkeit des GPS-Empfängers.	47
3.2	Relevante Fahrspuren und Kollisionsbereiche	48
3.3	Relevante Fahrspuren und Kollisionsbereiche der Hauptkreuzung am Testgelände Friedberg.	49
3.4	Übersicht Testgelände Friedberg.	49
3.5	Übersicht der Verkehrsführung am Testgelände Friedberg.	50
3.6	Modellierte Geschwindigkeitsverläufe bei Annäherung an eine Kreuzung.	51
3.7	Screenshot des grafischen Auswertetools.	53
3.8	Beispiel für eine Warnsituation an der Hauptkreuzung	55
3.9	Zuordnung von Heading auf eine Himmelsrichtung	56
4.1	Mögliche Manöver: Kreuzen, Linkseinbiegen und Rechtseinbiegen	59

4.2	Fahrzeug mit aufgespanntem Fahrfächer	60
4.3	Fahrschlauchmodell: Trajektorie und der zugehörige Fahrschlauch mit der Breite FSB	60
4.4	Auswertung der GPS-Höheninformation über eine ca. 30 km lange Strecke.	61
4.5	Auswertung der Genauigkeit der GPS-Höheninformation	62
4.6	Darstellung von zwei Fahrzeugen in der X-Y-Ebene.	63
4.7	Fahrzeuge und die zugehörigen Trajektorien.	63
4.8	Fahrzeugkoordinatensystem und Heading	64
4.9	Gierrate: Berechnung des Längs- und Querversatzes	65
4.10	GIDAS-Datenbank: Kreuzungsunfalltypen und Häufigkeit	67
4.11	Übersicht über die häufigsten Unfalltypen im Kreuzungsbereich	67
4.12	GIDAS-Codebook: Definition der Aufprallrichtung	68
4.13	GIDAS-Datenbank: Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen . . .	68
4.14	Blockdiagramm des implementierten Warnalgorithmus	70
4.15	Ablaufdiagramm der Trajektorienprädiktion	72
4.16	Variation der Schrittweite: Links zu klein, in der Mitte zu groß und rechts richtig gewählt.	73
B.1	Idealisierte Anfahrten bei verschiedenen Tempolimits	88
B.2	Mittelwerte und Mediane der Geschwindigkeit an verschiedenen Verkehrszeichen	89
B.3	Autobahnabfahrt: Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker	90
B.4	Landstraße: Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker	91
B.5	Mittelwerte und Mediane der Geschwindigkeit an verschiedenen Verkehrszeichen	92
B.6	Autobahnabfahrt: Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker	93
B.7	Landstraße: Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker	94
C.1	Unfalltype 301: Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen	95
C.2	Unfalltype 302: Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen	96
C.3	Unfalltype 303: Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen	96
C.4	Unfalltype 321: Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen	97
C.5	Unfalltype 322: Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen	97

Tabellenverzeichnis

2.1	Umfang der Auswertung	37
2.2	Ohne Warnung: Absolute und relative Abweichung von der Normkurve . . .	39
2.3	Mit Warnung: Absolute und relative Abweichung von der Normkurve . . .	40
2.4	Erhaltene Ergebnisse bei der Auswertung der Update-Rate.	43
3.1	RMS-Fehler für Position und Kurswinkel.	47
3.2	Automatisch ausgewertete Parameter	54
4.1	Zusammenhang zwischen maximaler Längsneigung und Geschwindigkeit . .	62
4.2	Gewählte Werte für benötigte Parameter	76
4.3	Übersicht über die erhaltenen TPs und FPs (TTA = 0.8 s).	79
4.4	Übersicht über die erhaltenen TPs und FPs bei Einbeziehung der aktuellen Beschleunigung.	79
4.5	Übersicht über die erhaltenen TPs und FPs bei Variation der TTA.	80
4.6	Variation der Safeparams	80
4.7	Differenz der Warnzeitpunkte zwischen dem simTD- und dem US-System. .	81
4.8	Mittelwert und Standardabweichung der TTC für die einzelnen Algorithmus- Generationen.	81
4.9	Höhendifferenz bei verschiedenen Längsneigungen	82

Kapitel 1

Einleitung

Laut WHO ereignen sich jedes Jahr weltweit zwanzig bis fünfzig Millionen Unfälle mit verletzten Personen und jährlich kommen 1.24 Millionen Menschen bei einem Verkehrsunfall ums Leben [WHO13]. Oder anders formuliert: Alle 25 Sekunden stirbt ein Mensch im Straßenverkehr. Dies ist eine erschreckende Statistik, und es sollte klar sein, dass hier Handlungsbedarf besteht. Leider sind die Standards bei der Verkehrssicherheit in manchen Ländern und Regionen dieser Welt nicht mit den Standards in Europa vergleichbar und einige dieser tödlichen Unfälle würden mit europäischen Autos glimpflicher ausgehen.

Dies ist aber kein Grund, sich auf diesem Vorteil bzw. Vorsprung auszuruhen. Vielmehr ist es wichtig, dass die sogenannten Industrieländer auch im Fahrzeugsicherheitssektor die Forschung weiter vorantreiben und Technologien entwickelt werden, die auf unseren Straßen täglich Menschenleben retten können.

Dazu braucht es aber natürlich neue Ideen und Ansätze. Es müssen Strategien erarbeitet werden, die dem Fahrer ein detaillierteres und umfassenderes Bild der derzeitigen Verkehrssituation liefern bzw. aus den gewonnenen Daten die Erkennung von kritischen Situationen ermöglichen. Dadurch wird es möglich, manche Unfälle zu vermeiden anstatt mit passiven Schutzkonzepten nur die Unfallschwere zu reduzieren. Es werden bereits Fahrzeuge serienmäßig mit physikalischen Sensoren (Ultraschallsensoren, Radarsysteme, Kameras, usw.) ausgerüstet, und diese Sensoren können den Fahrer unterstützen bzw. ihm helfen, gefährliche Situationen zu erkennen und richtig darauf zu reagieren.

Mit der Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit der umliegenden Infrastruktur (Ampeln, Verkehrszeichen, usw.) kann ein weiterer wichtiger Schritt gesetzt werden. Über kabellose Verbindungswege können zusätzliche Daten und Informationen zur aktuellen Verkehrssituation geliefert und dadurch in manchen Fällen sogar ein Blick in die Zukunft (Stauwarner: „Achtung Stau in 3 km!“) ermöglicht werden.

Durch *Car-to-Car-Communication* (C2C) bzw. *Car-to-Infrastructure-Communication* (C2I) können hinsichtlich der Fahrzeugsicherheit ganz neue Wege beschritten werden, und es gilt nun, die Möglichkeiten dieser Systeme zu evaluieren.

1.1 State of the Art

Die Idee, Fahrzeuge miteinander bzw. mit der umliegenden Infrastruktur zu vernetzen, ist nicht neu. Die ersten Versuche dazu gab es bereits im Zuge des EUREKA Prometheus

Projektes (1987-1995) [EUR13]. Im Jahre 1999 wurden von der amerikanischen *Federal Communications Commission* einige Frequenzbänder für die C2X-Kommunikation reserviert [ETSI13].

Die Abkürzung C2X leitet sich aus den Abkürzungen C2C und C2I ab. Das X steht dabei also für die Kommunikation mit der Umwelt, also anderen Fahrzeugen und entsprechend ausgerüsteten Infrastrukturkomponenten. Es können natürlich nicht nur Autos sondern jede Art von Fahrzeug mit der entsprechenden Technologie ausgerüstet werden. In der Literatur sind häufig auch die Abkürzungen V2V (Vehicle-to-Vehicle-Communication) bzw. V2X (Vehicle-to-X-Communication) zu finden.

1.1.1 C2X-Feldversuche weltweit

Im Moment laufen weltweit einige Feldversuche zu diesem Thema. Primär sollen diese Versuche zum einen die Wirksamkeit von C2X-Systemen zeigen und zum anderen die Fahrer-Akzeptanz evaluieren.

Der europaweit größte Feldversuch wird derzeit in Deutschland durchgeführt. Im Rahmen des Projektes „Sichere Intelligente Mobilität im Testfeld Deutschland“ (simTD) kommt eine Versuchsflotte von über 100 Fahrzeugen zum Einsatz (siehe auch Abschnitt 1.5). Im Zuge des Versuchs soll die Wirksamkeit von zahlreichen C2C- und C2X-Funktionen überprüft werden [sK13].

Auch in Österreich wird zu diesem Thema Forschung betrieben, und so wurde 2011 von der ASFINAG das Projekt „Testfeld Telematik“ gestartet. Über 3000 Fahrer können während der Projektlaufzeit das System auf den Versuchsstrecken testen. Dabei wird eine Vielzahl an kooperativen Diensten im C2X-Bereich erprobt [Tel13].

In den USA wird zurzeit von der NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) der Feldversuch „SaftetyPilot“ durchgeführt. Dabei soll bis Sommer 2013 eine Flotte von über 3000 Versuchsfahrzeugen eingesetzt werden, um Daten zur späteren Auswertung zu sammeln [oTNHTSA13]. Bei SaftetyPilot wird die Effektivität sowie die Fahrer-Akzeptanz von C2X-Systemen im Straßenverkehr evaluiert und eine Potential-Analyse bezüglich der Steigerung der Verkehrssicherheit durch die Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur durchgeführt [RA13].

Die nächsten wichtigen Schritte führen über eine Standardisierung bzw. Normung hin zu einer gesetzlichen Verankerung von solchen Systemen. Dadurch würden die OEMs gezwungen, in einigen Jahren die C2X-Systeme serienmäßig in die Fahrzeuge zu integrieren. Die USA könnte dabei in naher Zukunft eine Vorreiterrolle übernehmen und die gesetzlichen Grundlagen schaffen.

1.2 Motivation

Im vorherigen Abschnitt wurden einige aktuelle Feldversuche im Bereich C2X-Systeme vorgestellt. Ziel der Projekte ist die Erprobung von verschiedensten C2C- und C2I-Anwendungen. Zur Evaluierung der einzelnen C2X-Funktionen muss für jede Funktion eine Auswertestrategie erarbeitet werden, um die Praxistauglichkeit und die Auswirkungen auf das Fahrerverhalten feststellen zu können. Dabei ist vor allem die Wirksamkeit und der Mehrwert

einer C2X-Anwendung im Vergleich zu einer bereits serienmäßig verbauten Variante (zum Beispiel Verkehrszeichenassistentz: kamera-basiertes System) interessant.

Für andere Funktionen kann die False-Positive-Rate, die angibt, wie viele Warnungen vom System in einer unkritischen Situation (also eine falsche Warnung) generiert wurden, als Gütekriterium herangezogen werden (zum Beispiel Querverkehrsassistentz: Generierte Warnung aufgrund eines querenden Fahrzeugs berechtigt oder nicht?).

Hinter den einzelnen Großversuchen stecken zum Teil andere technische Ansätze, verschiedenste Philosophien und unterschiedliche Funktionalität. Zum Teil werden verschiedene Frequenzbänder für die C2C-Kommunikation verwendet oder es kommen unterschiedliche Hardwarekomponenten (z.B.: Standard-GPS-Receiver vs. hochintegrierte „All-in-one“-C2X-Lösungen) zum Einsatz. Eine weitere Unterscheidung kann anhand der Menge an zur Verfügungen gestellten bzw. von den Systemen benötigten Zusatzinformationen (Kartenmaterial, Kreuzungstopologien, Verkehrszeichendatenbank, Umfang der C2C-Nachrichten, usw.) getroffen werden.

Für OEMs stellt sich nun natürlich die Frage, wie kompatibel die einzelnen Systeme untereinander sind, welche Änderungen bzw. Anpassungen vorgenommen werden müssen, um ein Fahrzeug für die unterschiedlichen Systeme auszurüsten, und welche Auswirkungen, Benefiz oder Einschränkungen, sich durch die verschiedenen Philosophien für die einzelnen C2X-Funktionen ergeben.

1.3 Aufgabenstellung

In diesem Kapitel wird die Aufgabenstellung der Projektarbeit vorgestellt. Die Kapitel 2 und 3 befassen sich mit der Evaluierung von zwei C2X-Funktionen des simTD-Projektes. Dazu mussten diese Funktionen und die technischen Zusammenhänge im Vorfeld eingehend studiert werden, um danach die Auswertung der Logdaten durchführen zu können.

Das 4.Kapitel umfasst die Implementierung eines Querverkehrsassistentzsystems und den Vergleich mit der entsprechenden simTD-Funktion.

1.3.1 simTD: Verkehrszeichenassistentz (VZA) - Kapitel 2

Es soll die Wirksamkeit der VZA evaluiert und die erhaltenen Ergebnisse anschließend diskutiert bzw. interpretiert werden. Zur Aufbereitung und Weiterverwendung der Logdaten müssen geeignete Skripte entwickelt bzw. die zur Verfügung gestellten Tools entsprechend angepasst werden. Aufgrund der sehr hohen Datenmenge muss auf eine sehr effiziente Verarbeitung/Filterung und eine kompakte Zwischenspeicherung der Daten geachtet werden. Zur Veranschaulichung der gefilterten Logdaten müssen ebenfalls geeignete Skripte implementiert werden.

1.3.2 simTD: Querverkehrsassistentz (QVA) - Kapitel 3

Zur Evaluierung dieser C2X-Funktion müssen die vom System generierten Warnungen betrachtet und als True-Positive (TP) bzw. False-Positive (FP) klassifiziert werden. Um die manuelle Einteilung der einzelnen Warnungen zu beschleunigen, sollen Skripte zur auto-

matisierten Situationsbeschreibung bzw. zur Erfassung von wichtigen Parametern implementiert werden.

1.3.3 Implementierung eines Kreuzungsassistenzsystems mit beschränkten Eingangsdaten - Kapitel 4

Auf Basis der simTD-QVA-Daten soll ein Vergleichssystem, das ohne Kartenmaterial und Kreuzungsinformation (geltende Verkehrsregelung) arbeitet, implementiert werden. Dazu muss zunächst eine geeignete Trajektorienprädiktion gefunden und getestet werden. Anschließend soll das System mit zusätzlichen Informationen versorgt werden, um die FP-Rate senken zu können. Im letzten Schritt sollen die Warnzeiten, die TTA (time to avoidance) variiert bzw. reduziert werden, um ebenfalls eine Verbesserung der FP-Rate zu erzielen. Zum Abschluss werden die erhaltenen Ergebnisse diskutiert und interpretiert. Zusätzlich soll eine Gegenüberstellung mit dem simTD-System erfolgen.

1.4 Gliederung

In **Kapitel 2** wird die simTD-Funktion Verkehrszeichenassistenz (VZA) evaluiert. Dazu erfolgt zunächst eine kurze Beschreibung der Funktion. Danach wird auf die Auswertung und die daraus resultierenden Ergebnisse näher eingegangen. Das Kapitel wird mit einer Interpretation der Ergebnisse abgeschlossen.

Kapitel 3 befasst sich mit einer weiteren simTD-Funktion. Es wird die Kreuzungs- und Querverkehrsassistenz (QVA) beschrieben und auf die im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit erstellten Auswerteskripte eingegangen. Die erhaltenen Ergebnisse werden diskutiert und interpretiert.

In **Kapitel 4** wird Schritt für Schritt eine (in Hinblick auf die FP- bzw. TP-Rate) möglichst effektive Kreuzungsassistenz entwickelt. Dazu werden simTD-Logdaten zu Vergleichszwecken herangezogen. Mit den gewonnenen Daten aus Kapitel drei wird schließlich eine Gegenüberstellung der beiden Funktionen durchgeführt.

1.5 Sichere Intelligente Mobilität: Testfeld Deutschland - simTD

Dieses Kapitel soll einen kurzen Einblick in das simTD-Projekt geben und zusätzlich eine grobe Beschreibung der verwendeten Technik und der dazugehörigen Architektur liefern.

1.5.1 Motivation zum simTD-Projekt

Noch nie waren Autos so sicher wie heute: Aktive und passive Sicherheitssysteme wie ABS¹, ESC² oder TCS³ sowie Airbags und Gurtstraffer sind inzwischen fast überall Stan-

¹Anti-Blockier-System

²Electronic Stability Control

³Traction Control System

dard. Folgende Auflistung soll jedoch zeigen, dass trotz allem noch einiges getan werden muss, um den Straßenverkehr in Zukunft effektiver und vor allem sicherer zu gestalten:

- Mobilität: Staus in Deutschland führen jährlich zu volkswirtschaftlichen Kosten von 17,4 Milliarden Euro (Schätzung, EU Kommission) [Wie09].
- Verkehrssicherheit: Ca. 70.000 Schwerverletzte und 4000 Tote auf Deutschlands Straßen (Destatis Verkehrsstatistik, 2012) [Des12].

simTD soll hier ansetzen: Durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien werden Einzelfahrzeuge untereinander und mit der umliegenden Infrastruktur vernetzt und vergrößern so den erfassbaren Bereich der Fahrzeugumgebung. So können potentiell gefährliche Situationen oft schon im Vorfeld durch eine informierte, *vorausschauende* Fahrweise entschärft werden [sK13].

1.5.2 Allgemeine Informationen

Dieser Abschnitt beschreibt die allgemeinen Rahmenbedingungen des simTD-Projektes und stellt Projektinhalte und umgesetzte Funktionen vor.

Inhalte von simTD

Das simTD-Projekt verfolgt weitreichende Ziele im Bereich der sicheren und effizienten Mobilität. Im Rahmen des Projektes wird der weltweit größte Feldversuch zum Thema C2X durchgeführt. Die Ergebnisse daraus lassen Schlüsse auf die Wirksamkeit von solchen Systemen auf die Verkehrssicherheit zu. Die wichtigsten Inhalte und Ziele sind in folgender Auflistung angeführt [Wie09]:

1. Demonstration und Untersuchung der Wirksamkeit von Anwendungen aus den Bereichen
 - Verkehrseffizienz und Mobilität
 - Sicherheit und Gefahrenwarnung
2. Weiterentwicklung und praktische Validierung der in den letzten Jahren entwickelten Technologien und Systeme für C2X-Kommunikation
3. Prototypischer Aufbau eines beispielhaften, infrastrukturseitigen Kommunikationsnetzes
 - Einbindung der Verkehrsbehörden, die Integrierte Gesamtverkehrsleitzentrale der Stadt Frankfurt am Main (IGLZ) und das Hessische Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen (HLSV) über Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (IRS⁴) und die Vernetzung von IRS und Server
 - Aufbau eines hybriden Systems: Zellularer Mobilfunk als Grundversorgungsebene (z.B.: GSM/UMTS) und Nahbereich-Kommunikation (ITS-G5A IEEE 802.11) als Zusatzversorgung für den Echtzeitbetrieb

⁴ITS Roadside Station

4. Erstellung von Funktionsmustern für die fahrzeug- und infrastrukturseitigen Systeme
5. Einführungsmodelle, Betreiber-Szenarien, volks- und betriebswirtschaftliche Bewertung

Ausgewählte simTD-Funktionen

Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die im Rahmen des simTD-Projektes umgesetzten C2X-Applikationen. In diesem Kapitel werden einzelne Funktionen herausgegriffen und auf deren Wirksamkeit bei der Markteinführung von C2X-Systemen hin untersucht.

Die serienmäßige Einführung von C2X-Systemen wird sich über mehrere Jahre erstrecken. Aus diesem Grund wird bei der Markteinführung der Prozentanteil von Fahrzeugen, die mit der entsprechenden Technologie ausgerüstet sind, recht niedrig sein. Daraus resultiert auch, dass die Wahrscheinlichkeit, ein anderes C2X-Fahrzeug in einer Gefahrensituation im Empfangsbereich zu haben, recht niedrig einzuschätzen ist. „Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Funktionen“ können jedoch ab der ersten Sekunde vom Fahrer *erlebt* werden und können somit auch als Verkaufsargument für ein C2X-System verwendet werden. Als Beispiele könnten hier das **Baustelleninformationssystem** oder auch die **Ampel-Phasen-Assistenz** genannt werden. Natürlich muss dazu auch die Infrastruktur entsprechend ausgerüstet werden.

Einsatzfahrzeuge werden wahrscheinlich ebenfalls recht früh mit der entsprechenden Technologie versehen. Aus diesem Grund wird sich die **Einsatzfahrzeugwarnung** schon sehr früh als eine nützliche C2C-Anwendung etablieren und kann einen Teil dazu beitragen, dass sich Einsatzfahrzeuge in Zukunft schneller und sicherer einer Unfallstelle nähern können. Klassische Fahrzeug-Fahrzeug-Applikationen, wie zum Beispiel die **Querverkehrsassistenz**, sind von den Informationen der in der Nähe befindlichen Fahrzeuge abhängig und können erst bei einer großen Abdeckung ihr volles Potential entfalten. Aus diesem Grund werden diese Funktionen in den ersten Jahren wohl keinen hohen Stellenwert haben.

simTD: Die Projektpartner

Die folgende Aufstellung gibt einen Überblick über alle Projektpartner, die sich an simTD beteiligen:

- **Automobilhersteller:** AUDI AG, BMW AG, BMW Forschung und Technik GmbH, Daimler AG, Ford, Adam Opel AG, Volkswagen AG
- **Zulieferer und Netzbetreiber:** Robert Bosch GmbH, Continental Teves AG, Deutsche Telekom AG
- **Wissenschaft:** Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), Technische Universität Berlin, Technische Universität München, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Universität Würzburg
- **Öffentliche Einrichtungen:** Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement, Stadt Frankfurt am Main



Abbildung 1.1: Umgesetzte C2X-Applikationen im simTD-Projekt [sK13]

Zahlen und Fakten

Die Eckdaten des simTD-Projektes kurz zusammengefasst:

- Laufzeit: September 2008 bis August 2013
- Budget / Förderung: ca. 53 Mio. Euro / ca. 30 Mio. Euro
 - plus ca. 8 Mio. Euro Infrastrukturinvestitionen des Bundes
 - plus ca. 8 Mio. Euro des Landes Hessen
- Gefördert durch:
 - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
 - Bundesministerium für Bildung und Forschung
 - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Das simTD-Testfeld

In und rund um Frankfurt wurden einige Streckenabschnitte mit simTD-Infrastrukturkomponenten ausgerüstet. Dabei wurde darauf geachtet, dass möglichst verschiedene Straßentypen während der Versuche befahren werden, da nur so eine aussagekräftige Validierung der Funktionen durchgeführt werden kann. Abbildung 1.2 zeigt das simTD-Testfeld, und es ist ersichtlich, dass bei der Wahl der Teststrecken eine ausgeglichene Mischung aus Autobahnen, Landstraßen und Straßen im Stadtbereich gewählt wurde. Somit kann die Wirksamkeit der C2X-Applikationen bei verschiedenen Straßentypen und daraus resultierend auch bei verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen erprobt werden.

1.5.3 Technische Beschreibung des simTD-Systems

In diesem Abschnitt erfolgt eine oberflächliche Beschreibung der technischen Komponenten des simTD-Projektes und deren Vernetzung bzw. Abhängigkeiten. Einzelne Kernkomponenten werden im Anschluss genauer behandelt.

simTD - „big picture“

Abbildung 1.3 zeigt das Zusammenspiel der einzelnen simTD-Komponenten. Das *Gehirn* des Systems befindet sich in der simTD Versuchszentrale. Dort laufen die Informationen der beiden Straßenbetreiber VZH (Verkehrszentrale Hessen) und IGLZ (Integrierte Gesamtverkehrsleitzentrale der Stadt Frankfurt am Main) zusammen. Diese Daten können bei Bedarf in aufbereiteter und komprimierter Form an die ITS Roadside Station (IRS) bzw. natürlich auch direkt an die Fahrzeuge, die sogenannten ITS Vehicle Stations (IVS), weiter gereicht werden. Die Güte der Übertragungsstrecken und die Anzahl an beteiligten/zwischen geschalteten Komponenten hat direkten Einfluss auf die Latenzzeit und kann damit die Korrektheit der C2X-Funktionen negativ beeinflussen.

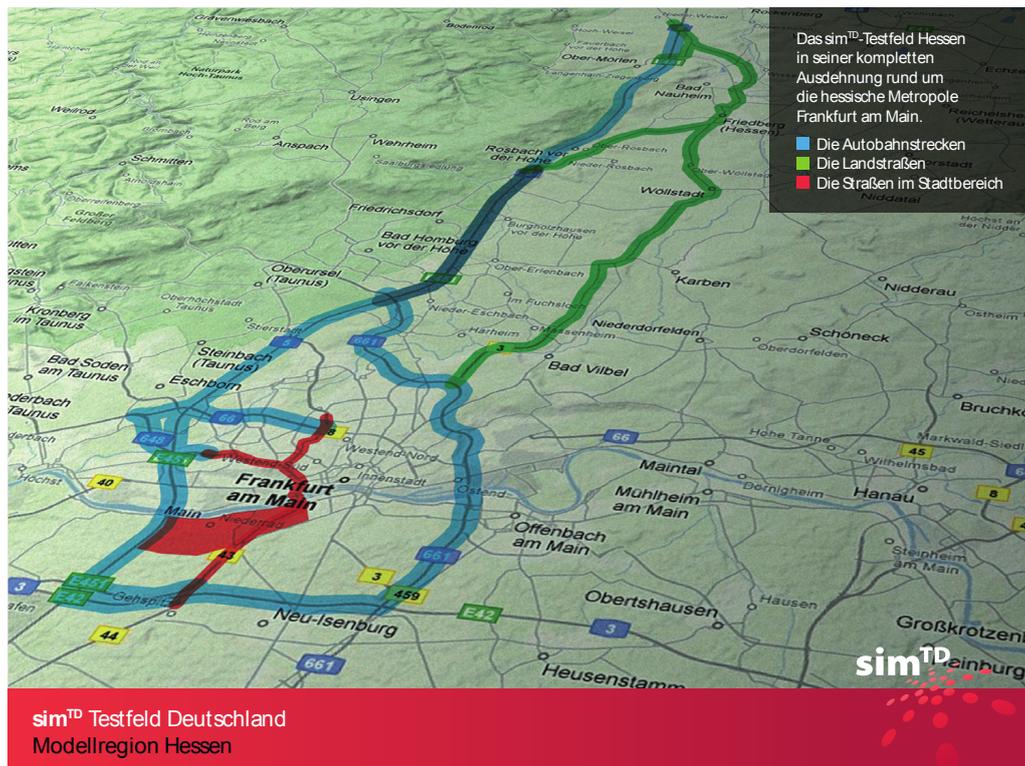


Abbildung 1.2: Übersicht über das simTD-Testfeld [sK13]

Gesamtarchitektur

Im letzten Abschnitt wurden die einzelnen Komponenten bereits kurz vorgestellt. In Abbildung 1.4 werden nun auch die verwendeten Übertragungsprotokolle angeführt und die Unterteilung der Komponenten in ihre Kernmodule präsentiert [SBB09].

IVS - CCU

Die Communication Control Unit (CCU) bündelt alle Kommunikationsaufgaben im Fahrzeug. Neben Standard-Kommunikationsmodulen (z.B. WLAN, UMTS) wird hier das speziell für die Car-2-X-Kommunikation vorgesehene Funkmodul (IST-G5A-basierte Kommunikation) integriert. Darüber hinaus werden in der CCU die zugehörigen Protokolle und der Zugriff auf den CAN-Bus (über die VAPI-Schnittstelle; siehe 1.5.3) realisiert. Die CCU ist via Ethernet (TCP/IP) mit der Application Unit (AU) verbunden und stellt den einzelnen C2X-Funktionen alle Daten gebündelt zur Verfügung.

IVS - AU

Die Architektur der AU sieht eine Aufteilung der Software in Applikationen (weiter unterteilt in Hauptfunktionen und Funktionen), Systemkomponenten und OSGi⁵-Komponenten

⁵Open Services Gateway initiative; www.osgi.org

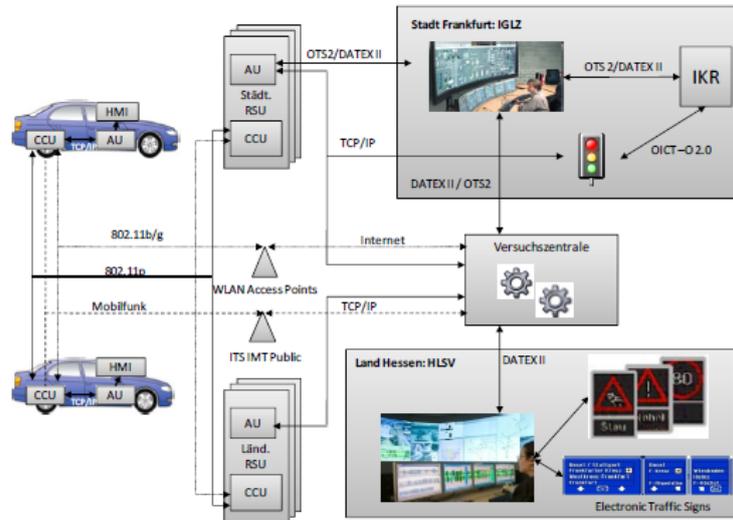


Abbildung 1.4: Überblick über das simTD-Gesamtsystem [SBB09]

mit definierten Zugriffsregeln vor, die alle innerhalb eines OSGi-Frameworks betrieben werden.

Die Benutzerführung (HMI) erfolgt auf einem separaten Gerät und kann als separate Komponente parallel zu AU und CCU angesehen werden.

Die VAPI-Schnittstelle

Viele Applikationen benötigen einen Echtzeit-Zugriff auf die Fahrzeugparameter. Die simTD-Flotte setzt sich aus Fahrzeugen verschiedener OEMs zusammen und somit ergibt sich das Problem, dass jeder Hersteller zwar den selben physikalischen Bus, den CAN-Bus, verwendet, aber keine einheitlichen bzw. standardisierten Übertragungsbotschaften existieren. Somit musste zwischen CCU und dem CAN-Bus eine Schnittstelle eingebracht werden, die die benötigten Parameter zu festgelegten Zeitpunkten und in vordefinierter Art und Weise zur Verfügung stellt. Die Vehicle API (VAPI) ist eine Schnittstelle, die Fahrzeugdaten zur Verfügung stellen kann, und dabei die Datenquelle (Bussystem) und die herstellerspezifischen Protokolle abstrahiert. Den Anwendungen der AU wird somit ein generischer Zugriff auf die Fahrzeugdaten ermöglicht. Die fahrzeugspezifische Architektur (Verwendung von CAN-Bus, Datenrepräsentation etc.) bleibt dabei verborgen. Neben Fahrzeugdaten werden in simTD GPS-Daten über die VAPI-Schnittstelle an die Applikationen verteilt, um eine synchrone Aufzeichnung von Fahrzeugdaten und Positionsdaten zu ermöglichen.

1.5.4 Aufbereitung der Logdaten

Der erste Schritt zur Auswertung der simTD-Logs ist die Aufbereitung und Vorfilterung der Daten. Dabei werden die Rohdaten zeitlich gefiltert, geschnitten und in einzelne Textfiles zerlegt. Diese Files können nun in Matlab importiert und in eine Matlab-eigene Struktur überführt werden, die bei oft verwendeten Datensätzen aus Performanz-Gründen ebenfalls abgelegt werden sollte.

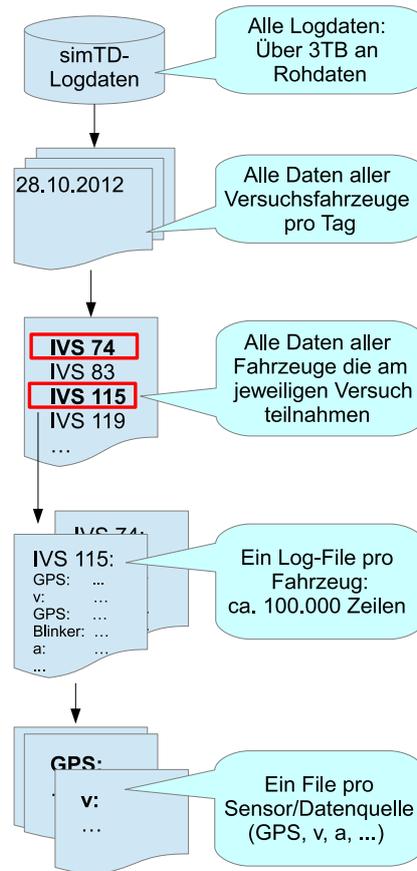


Abbildung 1.5: Aufbereitung der simTD-Rohdaten

Vorfiltern und Extrahieren der benötigten Daten

Die Daten liegen immer für 24 Stunden und pro Fahrzeug vor. Daher muss zuerst eine zeitliche Vorfilterung erfolgen, um ausschließlich die Daten eines bestimmten Testlaufes zu erhalten. Als nächstes werden die Daten nach Auswertekriterien, zum Beispiel einer Kreuzungssituation oder das Fahrzeug befindet sich laut GPS-Informationen in einem vordefinierten Bereich, durchsucht und diese mit einer bestimmten Vor- und Nachlaufzeit extrahiert und abgelegt. Dazu kann angegeben werden, welche Datenfelder von Interesse sind bzw. für die nachfolgende Auswertung benötigt werden. Die Daten werden Eventgetriggert mitgeloggt. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Daten noch auf eine gemeinsame Zeitbasis zu bringen, um bei jedem Zeitschritt alle Sensordaten zur Verfügung zu haben. In Abbildung 1.5 wird der Ablauf nochmals grafisch dargestellt.

Bereits vorhandene Filter- und Auswertetools

Es wurden von Seiten der BMW Forschung und Technik bereits bestehende Tools und Matlab-Skripte zur Filterung und grafischen Aufbereitung der Daten zur Verfügung gestellt.

Für die Vorfilterung der Daten wurde ein Java-Tool implementiert, dass über ein

Config-File entsprechend konfiguriert und somit an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann. Die Filterung zerlegt das große Log-File (ca. 100.000 Zeilen) in einzelne Text-Dateien. Jede Datei enthält die Log-Informationen eines Sensors. Jede Zeile beinhaltet einen Zeitstempel und den zugehörigen Sensorwert.

Im nächsten Schritt werden diese einzelnen Files via Matlab-Skripte in eine Matlab-eigene Struktur umgewandelt. Ein weiteres Skript kann diese Struktur schließlich noch auf eine gemeinsame Zeitbasis konvertieren.

1.6 Technische Voraussetzungen

1.6.1 GPS

Das *Global Positioning System* (GPS) ist ein weltweit bekanntes, Satelliten-gestütztes Positionierungssystem, das in praktisch allen Outdoor-Navigationsgeräten zum Einsatz kommt [Man98].

Die vom GPS-Receiver erhaltenen Positionsdaten können beispielsweise durch Satelliten-Verdeckungen infolge höherer Gebäude am Straßenrandbereich, durch Mehrwegeausbreitung von Signalen (Multipath-Effekte), durch Verdeckungen in Tunneln, Unterführungen und unter Brücken, kurzzeitig ausfallen oder beeinträchtigt sein. Durch geeignete Filter kann die Positionsgenauigkeit zusätzlich verbessert und den eben genannten Einflüssen entgegengewirkt werden.

simtTD: Bessere Ortung

In simTD werden die GPS-Rohdaten mit Hilfe der Fahrzeugdaten weiter aufbereitet und dadurch die Positionsgenauigkeit gesteigert. Ein auf dem Kalman-Filter [Kal60] basierender Positionsfilter erreicht durch die Nutzung verfügbarer, dynamischer Genauigkeitsinformationen eine optimale Integration der absoluten GPS-Daten mit verfügbaren Onboard-Daten zur relativen Fahrzeugbewegung. Kurzzeitige GPS-Ausfälle können damit durch Koppelnavigation vollständig überbrückt und der Einfluss von einzelnen GPS-Messfehlern minimiert werden [SZA13].

Geodätische Abbildung: Transformation von WGS84 in die x-y-Ebene

Die Transformation von Breiten- und Längengraden in x-y-Koordinaten wird Geodätische Abbildung genannt. Eine Annäherung an die Erdgestalt wird durch ein sogenanntes Rotationsellipsoid realisiert. Die GPS-Koordinaten, bestehend aus Längen- und Breitengrad, beziehen sich auf das rotationssymmetrische WGS-84⁶ Ellipsoid. Durch eine Transformation können diese in einem orthogonalen Koordinatensystem, dem Fahrzeugkoordinatensystem, abgebildet werden. Dabei ist die positive x-Achse nach Norden und die positive y-Achse nach Westen gerichtet. Sie geben den Abstand zum im Vorfeld angegebenen Bezugspunkt in Metern an. Als möglicher Bezugspunkt kann zum Beispiel der erste erhaltene Messpunkt herangezogen werden [Man98].

⁶World Geodetic System (WGS), 1984

1.6.2 IEEE 802.11p

IEEE 802.11p ist ein im Juli 2010 publizierter Standard zur Erweiterung der IEEE 802.11-Norm, um die WLAN-Technik in Fahrzeugen zu etablieren und eine zuverlässige Schnittstelle für Anwendungen intelligenter Verkehrssysteme zu schaffen [JD08]. Der Informationsaustausch basiert im Wesentlichen auf verbindungsloser, paketorientierter Kommunikation.

ITS G5A in simTD

ITS G5A, basierend auf dem IEEE 802.11p Standard, stellt ein Kommunikationsmedium für sicherheits- und verkehrsrelevante Informationen dar. ITS Vehicle Stations und ITS Roadside Stations bilden dabei ein dynamisches Ad-hoc-Netzwerk, in dem die Bandbreite und die eingeschränkte Konnektivität der Partner eine entscheidende Rolle spielen.

Im C2X-Umfeld werden Nachrichten, CAMs und DENMs (siehe dazu [HNM09]), nicht zwangsweise zwischen Softwarekomponenten der gleichen Funktion in den Systemen der Kommunikationspartner ausgetauscht. In den meisten Fällen werden die in den Nachrichten versendeten Daten von mehreren Funktionen benötigt. Aus diesem Grund gibt es eine klare Trennung zwischen dem Senden und dem Empfangen von C2X-Messages.

Das Aussenden der Nachrichten wird in vielen Fällen von den Funktionen direkt veranlasst und zumeist als Geocast, Nachrichten an alle erreichbaren Teilnehmer in einem geografisch abgegrenzten Bereich (z.B.: Alle IVS im Bereich einer IRS), durchgeführt.

Nachrichten, die von einer ITS Station empfangen werden, werden teilweise von mehreren unterschiedlichen Funktionen der Application Unit genutzt [SBB09]. Das beste Beispiel hierzu sind die CAMs, das heißt Nachrichten, die Informationen über die Präsenz und den grundlegenden Status der umliegenden Kommunikationspartner (IVS, IRS) beinhalten. Diese können unter anderem von der Querverkehrsassistenz genutzt werden, um mögliche Konfliktpartner zu erkennen oder von einer Stauerkennungsfunktion, um die Verkehrslage in der Umgebung besser einzuschätzen, aber auch um Infrastrukturkomponenten, wie Lichtsignalanlagen, bedarfsgerecht zu steuern. Auf Empfängerseite werden die Nachrichten daher nicht direkt einer einzelnen Funktion zugeordnet sondern in einer Umfeldtabelle abgelegt, die von allen AU-Funktionen gelesen bzw. benutzt werden kann.

Kapitel 2

Verkehrszeichen-Assistenz (VZA) in simTD

Überhöhte Geschwindigkeit ist eine der häufigsten Unfallursachen in Deutschland. Laut Destatis-Bericht von 2012 wird bei mehr als 12% aller Unfälle mit Personenschaden erhöhte Geschwindigkeit als Grund für den Unfall angegeben [Des12]. Aus der eben genannten Statistik geht die Nichtbeachtung der herrschenden Vorrangregelung als eine weitere wesentliche Unfallquelle hervor.

Hier soll das Verkehrszeichenassistenzsystem ansetzen. Der Fahrer wird schon Sekunden vor Gültigkeit eines Verkehrszeichens, sei es eine Geschwindigkeitsbegrenzung oder auch ein Stopp-Schild, auf dieses hingewiesen. Es wird ihm damit die Möglichkeit geboten, sein Fahrverhalten frühzeitig an die neue Situation anzupassen. Daraus erhofft man sich zum einen ein effizienteres Fahrverhalten und zum anderen eine sicherere Fahrweise. Bei Nichtbeachtung der geltenden Verkehrsregeln ist eine Warnung des Fahrers durchaus denkbar. Aus der Anzeige der Verkehrszeichen im Fahrzeug ergibt sich für den Lenker zusätzlich der Vorteil, dass er somit ständig die aktuell geltenden Verkehrsregeln mit einem Blick erfassen kann.

VZA-Systeme sind grundsätzlich nicht neu, sondern kommen bei einigen Herstellern schon serienmäßig zum Einsatz. Diese Systeme nutzen eine Kamera als optischen Sensor, um ein Verkehrszeichen zu erkennen und dieses im Fahrzeug anzuzeigen. Der Sensor hat bei Verschmutzung (z.B.: Schneematsch) oder schlechter Sicht (z.B.: dichter Nebel) Probleme bei der Erkennung des Zeichens. Situationsabhängige Zusatzinformationen (z.B.: *bei Nässe, von 20 bis 6h*) werden von diesen Systemen in den meisten Fällen auch nicht erkannt bzw. bei der Anzeige miteinbezogen. Ein funkbasiertes System ist hingegen nicht auf einen optischen Sensor angewiesen und ist somit nicht so stark von Umwelteinflüssen abhängig. Situationsabhängige Zusatzinformationen lassen sich sehr gut integrieren bzw. können in die Entscheidung, ob ein Verkehrszeichen im Fahrzeug angezeigt werden soll, miteinbezogen werden. Es erfordert im Gegensatz zu einem autonomen, Kamera-basierten System jedoch auch einen erheblichen Mehraufwand bezüglich benötigter Infrastruktur und resultierend daraus ergeben sich auch zahlreiche neue Fehlerquellen und Latenzzeiten. Es muss eine flächendeckende Datenbank, in der alle Verkehrszeichen abgelegt und die jederzeit aktuell gehalten werden muss, aufgebaut und gewartet werden. Dies setzt auch voraus, dass alle Straßenbetreiber und Verkehrsbehörden die Möglichkeit aber natürlich

auch die Verpflichtung haben, eventuelle Änderungen (neues VZ oder bestehendes VZ wurden entfernt) umgehend in die Datenbank einzuarbeiten. In jedem Fahrzeug muss ebenfalls eine Datenbank integriert, mit Ressourcen (Speicher, Rechenleistung) versorgt und mittels IRS oder UMTS aktuell gehalten werden.

Die Fusion von optischen und funkbasierten Systemen wäre ebenfalls denkbar. Dabei könnte die Kamera helfen, empfangene Verkehrszeichen zu validieren bzw. neue Zeichen zu erfassen.

2.1 Funktionsbeschreibung

Die simTD-Funktion VZA informiert den Fahrer über die für seine Fahrsituation relevanten und vom System unterstützten Verkehrszeichen in seinem Umfeld durch Anzeige der entsprechenden Verkehrszeichen im Fahrzeug [EZN12]. Gegebenenfalls kann zusätzlich zum Verkehrszeichen auch eine zugehörige Handlungsanweisung am Display dargestellt werden. Die VZA schließt statische sowie Wechsel-Verkehrszeichen ein. Ort und Bedeutung der Verkehrszeichen werden in das Fahrzeug übertragen. Dabei werden die Verkehrszeichen auf ihre Beachtung und Einhaltung hin überprüft und der Fahrer wird gegebenenfalls zusätzlich gewarnt, wenn eine Vorschrift nicht eingehalten oder ein Gefahrenhinweis nicht ausreichend beachtet wird. Der Lenker wird frühzeitig auf das Verkehrszeichen und seine Zusatzinformation hingewiesen und diese Information bleibt über den ganzen Geltungsbereich aktiv und präsent. Somit hat der Fahrer die Möglichkeit, auch nach Passieren eines Verkehrszeichens, die momentan geltende Verkehrsregelung abzurufen. Die Verkehrszeichendaten werden entweder per WLAN oder UMTS ins Fahrzeug übertragen oder es stehen bereits Informationen über die Verkehrszeichen in der lokalen Datenbank des Fahrzeugs zur Verfügung. Durch entsprechende Prioritätsmechanismen wird sichergestellt, dass nur die relevanten Verkehrszeichen angezeigt werden und der Fahrer nicht durch unnötige Informationen überfordert wird.

2.1.1 Berücksichtigte Verkehrszeichentypen

Die Verkehrszeichenassistenz wurde für verschiedene Verkehrszeichentypen (Klassifizierung lt. StVO) entworfen und implementiert [EZN12]:

- *Vorschriftzeichen* definieren (neben den Lichtsignalanlagen) die aktuell geltende Verkehrsregelung, insbesondere auch hinsichtlich Vorfahrt und zulässiger Höchstgeschwindigkeit. Die Vorschriftzeichen werden im Sinne einer Handlungsanweisung, z.B.: „Halt (in x Metern)! Vorfahrt gewähren!“ angezeigt. Bei Nichtbefolgung kann gewarnt werden.
- Einzelne *Richtzeichen* sind mit einer Verkehrsregelung verbunden. Die Einhaltung dieser Verkehrsregelung durch den Fahrer wird von der VZA-Funktion überwacht und es kann ggf. bei (drohender) Verletzung eine Warnung oder eine Handlungsanweisung ausgesprochen werden.
- Die dritte Gruppe von Verkehrszeichen umfasst die *Gefahrenzeichen*. Als Gefahrenzeichen werden nur fest installierte Verkehrszeichen einbezogen und so wird auch

die Unterscheidung zwischen den simTD-Funktionen „Verkehrszeichenassistent“ und „Lokale Gefahrenwarnung“¹ getroffen.

2.1.2 VZA Betriebsmodi

Bei der Umsetzung der VZA wurden zwei verschiedene Arbeitsweisen erarbeitet, implementiert und erprobt:

1. *VZA ohne Warnung*: Ort und Bedeutung von Verkehrszeichen aller 3 Typen (Richtzeichen, Vorschriftszeichen und Gefahrzeichen) werden von Infrastrukturkomponenten ausgesendet und im Fahrzeug angezeigt. Die Anzeige hat rein informativen Charakter und dient der Orientierung des Fahrers.
2. *VZA mit Warnung bei Nichtbeachtung von Verkehrszeichen*: Zusätzlich zur Anzeige der Verkehrszeichen im Fahrzeug wird der Fahrer (visuell und akustisch) gewarnt, wenn eine Verletzung der angezeigten Verkehrsregeln vorliegt bzw. wahrscheinlich ist.

2.1.3 Effektives Fahrerverhalten

Durch die VZA soll ein möglichst effizientes Fahrverhalten ermöglicht bzw. erzielt werden. Die Logdaten wurden in weiterer Folge auch auf dieses idealisierte Modell hin überprüft. Abbildung 2.1 zeigt eine möglichst effiziente und idealisierte Annäherung an ein Verkehrszeichen (blaue Kurve) verglichen mit einer durchschnittlichen Anfahrt (rote Kurve) ohne VZA.

Folgender Ablauf wurde bei der Entwicklung der VZA angestrebt: *Der Fahrer wird vom System schon 250 Meter vor dem VZ darauf hingewiesen, dass die Geschwindigkeit von 100 km/h auf 70 km/h reduziert werden muss. Der Lenker nimmt deshalb frühzeitig den Fuß vom Gas und erreicht das neue Tempolimit bei Passieren des Verkehrszeichen ohne Betätigung der Bremse.*

2.2 simTD: Technische Umsetzung

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung der VZA bei simTD überblicksmäßig vorgestellt. Auf Implementierungsdetails wird jedoch nicht eingegangen [EZN12].

2.2.1 Komponenten Diagramm

Abbildung 2.2 zeigt das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten. Zu Beginn des simTD-Feldtests wurde die lokale Datenbank der Versuchsfahrzeuge mit ca. 1000 festinstallierten Verkehrszeichen initialisiert. Via IRS² oder Mobilfunknetz können weitere Verkehrszeichen in das Fahrzeug übertragen bzw. bereits bestehende Datenbankeinträge

¹Es werden zeit- und ortsnahe Meldungen von Hindernissen übertragen, welche aus unterschiedlichen Informationsquellen stammen. Im empfangenden Fahrzeug wird der Fahrer bei Annäherung rechtzeitig gewarnt.

²ITS roadside station, Übertragung per WLAN

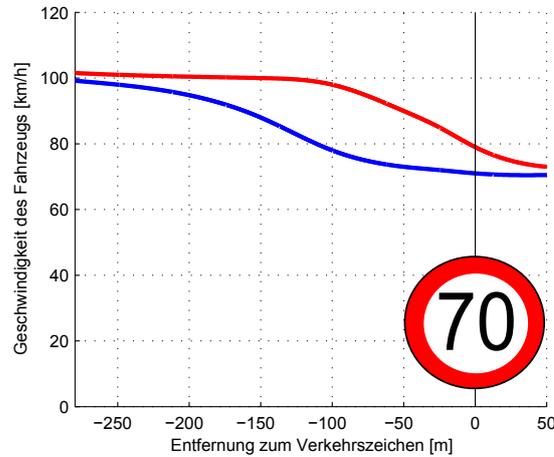


Abbildung 2.1: Vergleich: Idealer Verlauf mit VZA (blau) und durchschnittlicher Verlauf (rot)

modifiziert werden (grüner Block). Zusätzlich könnten bei zukünftigen Systemgenerationen die Daten von Kamera-basierten Assistenzsystemen in die Datenbank übernommen bzw. zum Plausibilisieren der empfangenen Verkehrszeichen verwendet werden. Während der Fahrt wird die Datenbank nach gültigen Verkehrszeichen für die Strecke bzw. die gerade befahrene Straße durchsucht und mit Hilfe der Daten von der VAPI³-Schnittstelle eine Relevanzprüfung (Fahrtrichtung, Ausnahmen durch Zusatztafeln, usw.) durchgeführt (blauer Block). Je nach Arbeitsmodus wird ein gültiges Verkehrszeichen in der Headunit angezeigt und gegebenenfalls eine Warnung generiert.

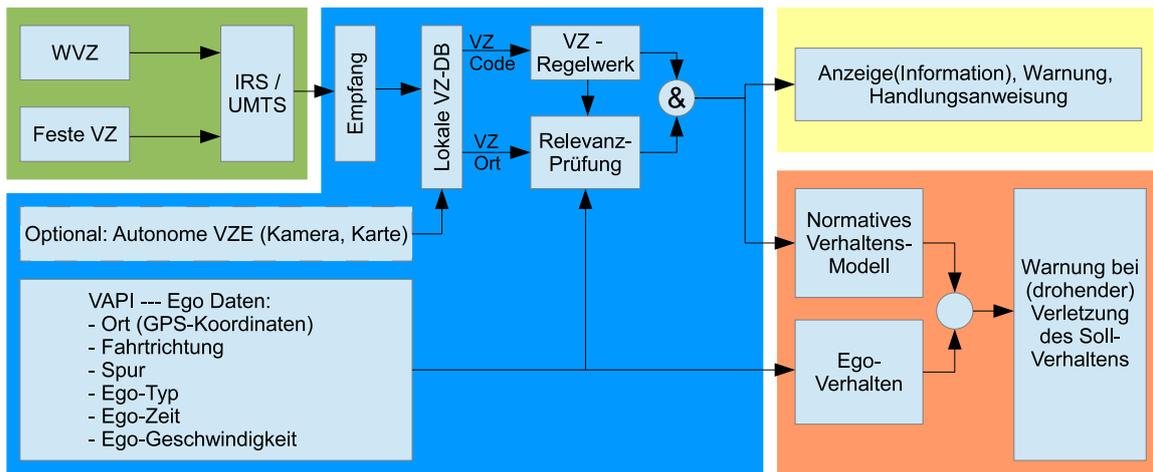


Abbildung 2.2: VZA-Komponentendiagramm

³siehe dazu Abschnitt 1.5.3

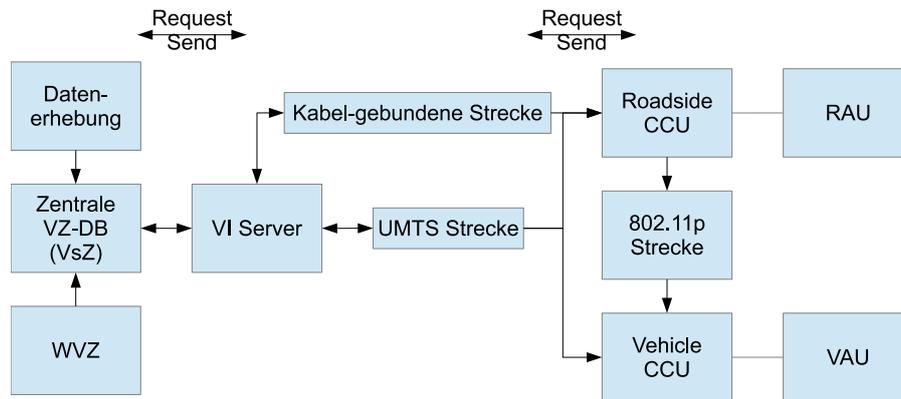


Abbildung 2.3: Übertragungswege zwischen den Komponenten

2.2.2 Die Gesamtstruktur

Abbildung 2.3 gibt einen Überblick über die Übertragungswege zwischen den Komponenten bzw. den beteiligten Units. Die nachfolgende Auflistung liefert zusätzliche Informationen über die Informationskanäle, die Refresh-Zyklen und die Datenbanken der einzelnen Units.

- Die zentrale VZ-Datenbank in der Versuchszentrale enthält alle VZ (auch Wechselverkehrszeichen (WVZ)) sowie die zugehörigen Positionsketten. Neue oder geänderte Verkehrszeichen müssen von den Straßenbetreibern an die simTD-Versuchszentrale weitergegeben und diese Änderungen müssen dann entsprechend in die Datenbank eingearbeitet werden.
- Vehicle Application Unit (VAU) und Roadside Application Unit (RAU) halten jeweils eine lokale VZ-Datenbank, die in bestimmten zeitlichen Abständen (täglich) aktualisiert wird. In der VAU ist eine komplette Kopie des Versuchsgebiets abgelegt, in den RAUs jeweils nur relevante Verkehrszeichen im Umkreis.
- Am Verkehrsinformationsserver (VI-Server) läuft eine VZA-spezifische Komponente, die den Request und Response von RAU und VAU verarbeitet. Der VI-Server steht physikalisch in der Versuchszentrale.
- Für statische VZ wird typisch einmal pro Tag von den IVSs bzw. auch den IRSs eine Update-Anfrage an den VI-Server gestellt.
- Bei WVZs, die sich in der Nähe des Fahrzeugs bzw. innerhalb der Reichweite einer Roadside Unit befinden, werden im Minutenabstand Update-Anfragen an den VI-Server gesendet.
- Die Roadside CCU / RAU sendet zyklisch (1 Sekunde) den gesamten Inhalt ihrer lokalen VZ-Datenbank über ITS G5A (WLAN). Mit diesen Daten können die IVSs, die sich in Reichweite der IRS befinden, ein Update der internen VZ-Datenbank durchführen.

2.2.3 VZA-Algorithmus und zugehöriger Funktionskern

Mit den oben genannten Schritten wird gewährleistet, dass die VZ-Datenbank des Fahrzeugs immer auf dem neuesten Stand ist. Dieser Abschnitt beschreibt nun den Algorithmus, der zur Anzeige eines Verkehrszeichens führt und gibt Informationen zu den beiden verschiedenen Arbeitsmodi (VZA mit/ohne Warnung bei Nichtbeachtung). Abbildung 2.4 zeigt das VZA-Ablaufdiagramm [EZN12]. Zunächst werden die fahrzeugspezifischen Daten über die VAPI-Schnittstelle (siehe dazu 1.5.3) geholt und abgelegt. Danach werden alle Verkehrszeichen der lokalen Datenbank schrittweise auf Relevanz geprüft.

Zunächst werden alle Verkehrszeichen aus der Datenbank in einem Rechteck bestehend aus neun Kacheln um die Ego-Position angeordnet und daraus die Verkehrszeichen in der näheren Umgebung des Fahrzeugs ermittelt. Danach wird mit Hilfe von statischen Relevanzkriterien (z.B. Fahrzeug-Art, Gültigkeitszeitraum, Gewicht, usw.) geprüft, ob die VZ für die vorliegende Ego-Situation überhaupt relevant sind. Dazu werden Haupt- und Zusatzzeichen validiert und alle verbleibenden Verkehrszeichen zur Weiterverarbeitung in einer Liste abgespeichert. Alle VZ dieser Liste werden mit Hilfe der Systemfunktion „Positionsketten“⁴ gematcht. Es wird geprüft, ob sich das Ego-Fahrzeug⁵ vor dem VZ oder in dessen Gültigkeitsbereich befindet. Für alle übrig gebliebenen Verkehrszeichen werden nun abhängig vom Arbeitsmodus die Anzeigeparameter für das HMI ermittelt:

- Im Infomodus werden die verbliebenen Verkehrszeichen bezüglich deren Priorität gereiht⁶ und zur Anzeige gebracht.
- Im Warnmodus werden die verbliebenen Verkehrszeichen in warn-relevante (Vorschriftzeichen) bzw. in nicht warn-relevante Verkehrszeichen unterteilt. Warn-relevante VZ sind Geschwindigkeitsbeschränkungen, Stopp-Schilder und Ein- bzw. Durchfahrtsbeschränkungen. Zunächst wird eine mögliche Regelverletzung und dessen Schwere ermittelt. Dazu wird bei Ein- bzw. Durchfahrtsbeschränkungen der Aufenthalt im Gültigkeitsbereich geprüft.

Für Tempolimits wird bei Annäherung an das Verkehrszeichen aus dem Abstand zum VZ, aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit und Verzögerung die erwartete Geschwindigkeit an der Position des Zeichens berechnet. Im Gültigkeitsbereich einer Geschwindigkeitsbeschränkung wird die aktuelle Ego-Geschwindigkeit überprüft. Wenn eine Übertretung des Limits erkannt wird, wird vom System eine Warnung generiert. Dabei wird noch zwischen *leichtem Überschreiten*, bei einer Differenz von bis zu 30 km/h und *schwerem Übertreten*, bei der Differenz von über 30 km/h⁷ unterschieden.

Bei der Annäherung an ein Stopp-Schild wird ebenfalls die erwartete Geschwindigkeit an der Position des VZ berechnet. Die Zielgeschwindigkeit ist hier 0 km/h. Die Warnstufen sind analog zur vorangegangenen Beschreibung festgelegt.

⁴Der Approach-Trace (Punkte entlang der Strecke vor dem eigentlichen Standort des Verkehrszeichens) eines Verkehrszeichens wird verwendet um festzustellen, ob ein VZ für den Algorithmus relevant ist oder nicht. Siehe dazu auch Abbildung 2.7

⁵Das betrachtete Versuchsfahrzeug wird in weiterer Folge als *Ego-Fahrzeug* (simTD interne Bezeichnung) verwendet. In der Literatur wird oft auch der Begriff *Target Vehicle* dafür verwendet.

⁶Es werden maximal sechs Verkehrszeichen angezeigt. Für weitere Informationen zur Reihung der VZ siehe [EZN12]

⁷vom Konsortium gewählter Wert

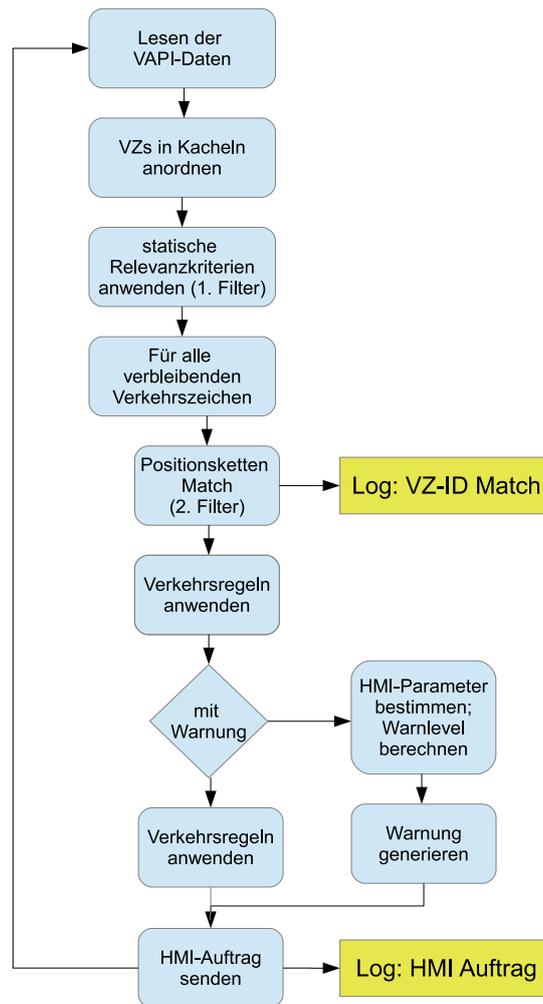


Abbildung 2.4: Ablaufdiagramm des VZA-Algorithmus



Abbildung 2.5: Beispiele für eine HMI-Anzeige

2.2.4 Anzeige der Verkehrszeichen im Fahrzeug

Nachdem die Verkehrszeichen gefiltert und die HMI-Parameter durch die VZA berechnet wurden, können die aktuell bzw. in Kürze geltenden Verkehrszeichen am simTD-Screen im Fahrzeug angezeigt werden. Abbildung 2.5 zeigt zwei mögliche Anzeigevarianten. Im linken Bild wird frühzeitig auf eine Fahrbahnverengung hingewiesen. Der Statusbalken gibt dem Fahrer zusätzliches Feedback über die verbleibende Distanz zum Verkehrszeichen. Im rechten Bild wird die Anzeige für eine mehrspurige Straße dargestellt.

2.3 simTD-VZA: Versuchsdurchführung und Logdaten

In diesem Kapitel wird kurz auf die Versuchsdurchführung eingegangen und es werden die erstellten Drehbücher erläutert. Des Weiteren wird die Verarbeitung der Logdaten behandelt.

2.3.1 Versuchsdurchführung

Zur Erprobung der VZA-Funktion mit bzw. ohne Warnung bei Nichtbeachtung der geltenden Verkehrsregelung wurden jeweils vier Drehbuchtests definiert [sKTB13].

Ein Drehbuchtest enthält die Beschreibung einer Teststrecke, die während der simTD-Versuchsdurchführung mehrmals befahren wurde und beschreibt zusätzlich den Ablauf und die Randbedingungen eines Testlaufes. Bei jedem Testlauf kommen Fahrzeuge, die mit der entsprechenden Technologie versehen sind, zum Einsatz. Die Fahrer sind dabei in eine Kontroll- und eine Experimentalgruppe unterteilt. Nur Fahrer der Experimentalgruppe bekommen Verkehrszeichen und Zusatzinformationen im Fahrzeug angezeigt.

Für einen großen Teil der Auswertung wurde je ein Drehbuch mit bzw. ohne Warnung ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass bei beiden Drehbüchern die gleiche Strecke in der selben Fahrtrichtung befahren wird und dass verschiedene Straßentypen (Autobahn, Landstraße und Innerorts-Bereich) abgedeckt werden. Abbildung 2.6 zeigt die zumeist gewählte Teststrecke der Drehbücher 47⁸ bzw. 268⁹.

⁸ohne Warnung

⁹mit Warnung bei Nichtbeachtung der geltenden Verkehrsregelung

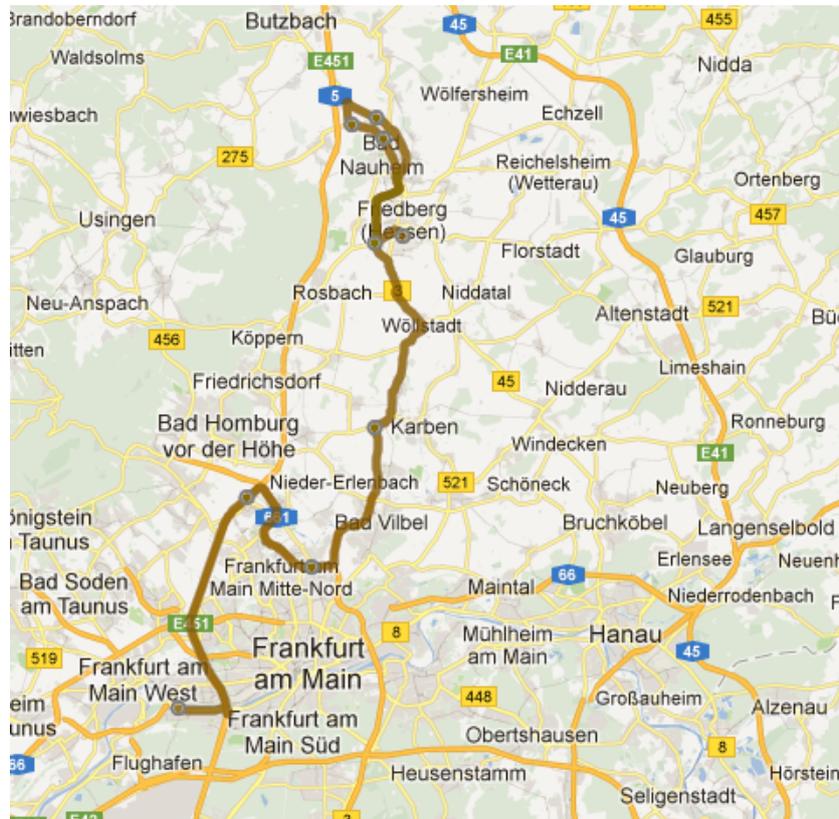


Abbildung 2.6: Die VZA-Teststrecke

2.3.2 Filterung der Logdaten

Wie in 1.5.4 beschrieben kann mit einem Java-Tool eine Vorfilterung der Daten durchgeführt werden. Dabei ist der Bereich ca. 500 Meter vor bis 500 Meter nach dem Verkehrszeichen (vor allem bei Übergängen von einem Tempolimit auf ein anderes) von Interesse. Um nun die Rohdaten auf die für die Auswertung benötigten Logs zu reduzieren, wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Verkehrszeichen für die Auswertung auswählen. Vor allem Übergänge von einem Tempolimit auf ein anderes waren von Interesse
2. Bereich rund um die ausgewählten Zeichen definieren und Logs außerhalb des Bereiches aussortieren
3. Logs von Fahrzeugen verwerfen, die nicht für den Versuch eingeteilt waren
4. Aufteilung in die beiden Versuchsgruppen

2.4 Vorauswertung

Parallel zum laufenden Versuchsbetrieb wurden bereits erste Auswertungen durchgeführt. Dabei war vor allem der Einfluss der VZA auf das Fahrverhalten der Probanden von Interesse. Die Auswertung wurde für mehrere Verkehrszeichen entlang der in Abbildung 2.6 dargestellte Strecke vorgenommen. Um eine Evaluierung durchführen zu können, wurden einige Auswerteskripte erstellt. Das Ergebnis der Auswertung für ein Verkehrszeichen entlang der Teststrecke wird im Anschluss präsentiert und diskutiert.

Abbildung 2.7 zeigt den Kartenausschnitt des ausgewerteten Verkehrszeichens. In Blau ist die Fahrtrichtung der Versuchsfahrzeuge eingezeichnet. Die rote Spur vor dem 70er-Schild stellt den Approach-Trace¹⁰ des Schildes dar. Auf diesem Streckenabschnitt ändert sich die erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auf 70 km/h. Es wird nun untersucht, ob die Anzeige des Verkehrszeichens im Fahrzeug eine Auswirkung auf das Fahrverhalten hat.

Dazu wurden zunächst die Geschwindigkeitsverläufe der beiden Gruppen gegenübergestellt. Abbildung 2.8 zeigt die Plots zur eben erwähnten Auswertung. Diese Darstellungsform ist bei vielen Anfahrten natürlich nicht mehr aussagekräftig bzw. übersichtlich. In diesem Fall soll die große Streuung bei den Anfahrten gezeigt werden.

Die Ausgangsdaten für die Plots wurden vorab für jedes Fahrzeug ermittelt und aus Performanzgründen zwischengespeichert. Dazu wurde die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zum Verkehrszeichen aus den Logdaten extrahiert und abgelegt.

Im nächsten Schritt wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen an den definierten Messpunkten für beide Gruppen ermittelt und grafisch aufbereitet. Abbildung 2.9 zeigt den erhaltenen Plot. Die Darstellung aus Mittelwert und Standardabweichung gibt einen raschen Überblick über die Streuung der Geschwindigkeitsverläufe und liefert zusätzlich einen guten Vergleich der beiden Gruppen.

¹⁰Nähert sich ein Fahrzeug auf dem Approach-Trace einem VZ an, wird dies im Anschluss gegebenenfalls angezeigt.



Abbildung 2.7: Kartenausschnitt: Ausgewertetes Verkehrszeichen

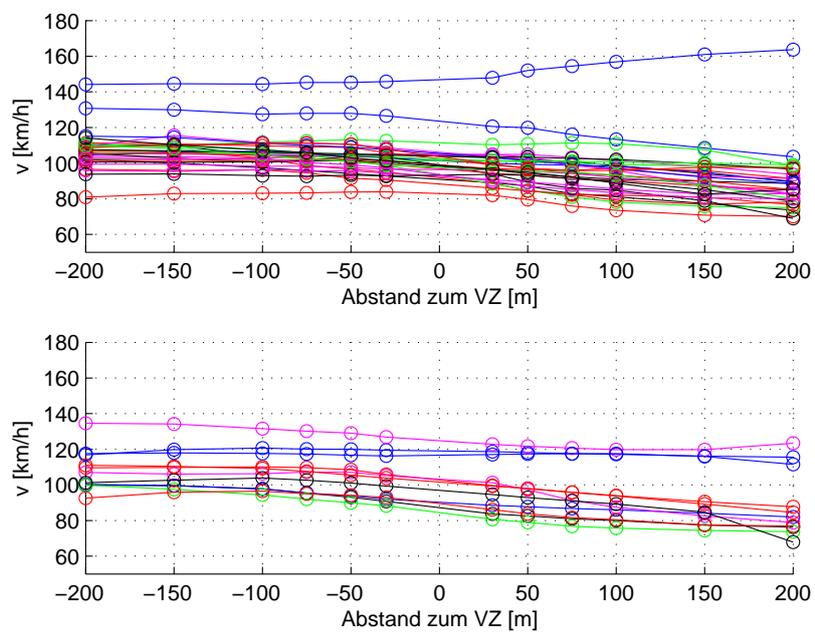


Abbildung 2.8: Geschwindigkeitsverläufe für beide Gruppen: Experimentalgruppe oben, Kontrollgruppe unten

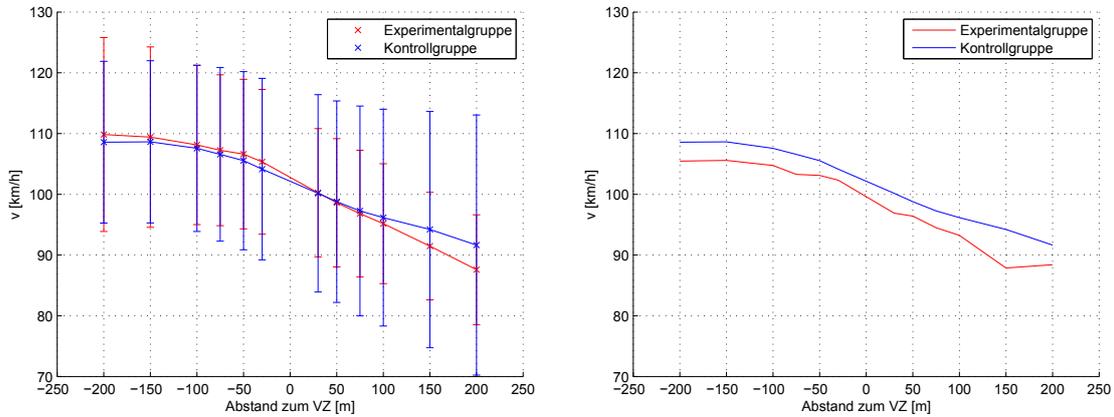


Abbildung 2.9: links: Plot der Mittelwerte und Standardabweichungen; rechts: Plot der Mediane

Der Plot 2.8 zeigt, dass sich einzelne Fahrer leider absolut nicht an die Tempolimits halten. Aufgrund der geringen Datenmenge, die zum Zeitpunkt der Auswertung zur Verfügung stand, wirkten sich solche Fahrten sehr stark auf den Plot in 2.9 aus und zogen den Mittelwert stark nach oben. Bei den Vorbereitungen zu den Fahrversuchen wird immer wieder darauf hingewiesen, dass die geltenden Verkehrsregeln unbedingt einzuhalten sind. Darum ist das Verhalten einiger Testfahrer schwer nachvollziehbar und kann, wie gerade gezeigt, das Ergebnis stark verfälschen. Es wäre natürlich auch möglich, solche Fahrten einfach auszusortieren und bei der Auswertung nicht zu berücksichtigen. Dies würde aber einer Beschönigung der Daten gleichkommen und wurde deshalb nicht durchgeführt. Dafür wurde zusätzlich ein Plot der Mediane erzeugt, um die Auswirkungen der Ausreißer auf das Ergebnis zu minimieren und eine zusätzliche Aussage treffen zu können. Dabei fällt auf, dass der Median der Experimentalgruppe um ein paar km/h unter dem Median der Kontrollgruppe liegt. Die Vorauswertung brachte also das Ergebnis, dass es durchaus Fahrer gibt, die die zusätzliche Information nutzen, um möglichst effizient zu fahren. Andere Versuchsteilnehmer zeigen sich jedoch komplett unbeeindruckt und berücksichtigen die Extrainformation gar nicht. Um diese Datenausreißer besser in den Griff zu bekommen, kann der Median herangezogen werden.

2.5 Hauptauswertung der Logdaten

Im Dezember 2012 wurden die letzten simTD-Testfahrten durchgeführt, die Logs der Testfahrzeuge gesammelt und das Testgelände zurückgebaut. Nun konnte die Auswertung mit allen Logdaten durchgeführt werden. Aufgrund der großen Datenmenge musste vor allem auf effiziente Vorfilterung der Daten geachtet werden. Die bei der Auswertung erstellten Plots ähneln sehr den in Kapitel 2.4 präsentierten Plots, beruhen jedoch auf einer wesentlich höheren Datenmenge (siehe Abschnitt 2.5.1). Aufgrund der hohen Anzahl an Anfahrten musste bei der Erstellung einiger Plots eine andere Darstellungsform für die Aufbereitung gewählt werden. Ein Teil der erstellten Auswertung wird im Anschluss präsentiert. Des Weiteren wird in diesem Kapitel erstmals eine Gegenüberstellung der beiden

	#Anfahrten: Vorauswertung		#Anfahrten: Hauptauswertung	
	Kontrollgr.	Experimentalgr.	Kontrollgr.	Experimentalgr.
mit Warnung	8	27	33	79
ohne Warnung	14	14	77	118

Tabelle 2.1: Umfang der Auswertung

unterschiedlichen VZA-Arbeitsmodi durchgeführt.

2.5.1 Ausgangsdaten

Für die Hauptauswertung wurden alle verfügbaren Datensätze heran gezogen um eine möglichst fundierte Aussage treffen zu können. Tabelle 2.1 gibt Auskunft über den Umfang der Vor- und der Hauptauswertung für beide Arbeitsmodi.

2.5.2 Darstellung der Anfahrten via Boxplots

Abbildung 2.8 aus Kapitel 2.4 zeigt einige Geschwindigkeitsverläufe im Bereich eines Tempolimits. Dieser Plot ist trotz der geringen Menge an Anfahrten schon recht unübersichtlich und es musste daher für die abschließende Auswertung eine bessere Darstellungsform gefunden werden, die zum einen das mittlere Fahrerverhalten und zum anderen auch etwaige Ausreißer darstellen kann. Boxplots bieten die eben geforderten Möglichkeiten [Mat13]. Die zentrale Marke in der Box markiert den Median und die untere bzw. obere Kante einer Box repräsentieren die 25% bzw. 75% Perzentile (auch unteres bzw. oberes Quartil genannt). In einer Box liegen also die mittleren 50% der Daten. Die beiden äußeren Markierungen werden als Antennen bzw. als Whisker bezeichnet. Die Länge der Whisker ist auf maximal das 1,5-Fache des Interquartilsabstands beschränkt. Dabei endet der Whisker jedoch nicht genau nach dieser Länge, sondern bei dem Wert aus den Daten, der gerade noch innerhalb dieser Grenze liegt. Die Länge der Whisker wird also durch die Datenwerte und nicht allein durch den Interquartilsabstand bestimmt. Dies ist auch der Grund, warum die Whisker nicht auf beiden Seiten gleich lang sein müssen. Werte außerhalb dieser Antennen sind als Ausreißer, in diesem Fall Testfahrer, deren Fahrverhalten sehr stark von der Norm abweicht, zu sehen und werden extra gekennzeichnet [Tuk77]. Zusammengefasst ermöglicht ein Boxplot-Diagramm einen recht guten Überblick über die Kennzahlen und die Streuung der Logdaten. Mögliche Ausreißer, in diesem Fall Fahrer, die sich nicht entsprechend verhalten, können ebenfalls dargestellt werden. Abbildung 2.10 zeigt einen im Rahmen der Auswertung erstellten Boxplot. Dafür wurden alle im Zuge des simTD-Projektes an einem Verkehrszeichen¹¹ aufgenommenen Logdaten im Modus „Warnung bei Nichtbeachtung der geltenden Verkehrsregelung“ verwendet. Man kann an den zahlreichen Ausreißern erkennen, dass sich einige Testfahrer leider nicht an die geltenden Verkehrsregeln und damit auch nicht an die Versuchsvorgaben gehalten haben. Die Größe der einzelnen Boxen und die Länge der Whisker zeigt, dass die Geschwindigkeiten bei den Anfahrten doch von Fahrer zu Fahrer recht unterschiedlich sind.

¹¹Von Tempo 100 km/h auf 70 km/h. Abbildung 2.7 zeigt den zugehörigen Kartenausschnitt

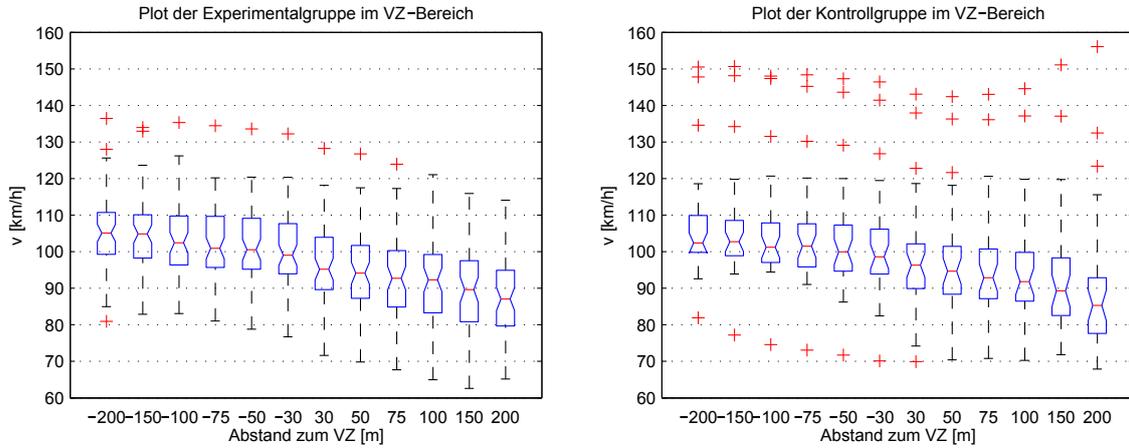


Abbildung 2.10: Boxplot der Geschwindigkeitsverläufe im Bereich VZ für beide Versuchsgruppen

Boxplot der Geschwindigkeitsverläufe im Bereich VZ aus Abbildung 2.7 für beide Versuchsgruppen.

2.5.3 Gegenüberstellung der Anfahrten via Normplot

Aus Abbildung 2.11 können zwei Erkenntnisse gewonnen werden. Zum einen ist klar ersichtlich, dass die ausgewerteten Daten nicht normalverteilt vorliegen. Die zweite und für diese Evaluierung bedeutendere Aussage kann bezüglich der Gegenüberstellung beider Versuchsgruppen getroffen werden. Es ist kein signifikanter Unterschied in den beiden Verläufen ersichtlich und eine Wirksamkeit des VZA-Systems bzw. eine Optimierung des Fahrverhaltens ist, zumindest in diesem Plot, nicht ersichtlich. Im Appendix B werden zusätzliche Verläufe präsentiert, die die obigen Aussagen noch weiter untermauern.

2.5.4 Abweichung von der Normkurve

Bisher wurde die gesamte Evaluierung mittels Diagrammen und Plots, also rein grafisch, durchgeführt. In diesem Abschnitt wird nun die Abweichung von der Normkurve, das sind die idealisierten Anfahrten an die Verkehrszeichen (siehe dazu Abschnitt 2.1.3 und Appendix B), für beide Versuchsgruppen berechnet und gegenübergestellt. Dazu wird sowohl die absolute wie auch die relative durchschnittliche quadratische Abweichung von der Normkurve pro Anfahrt und Messpunkt bestimmt.

Die absolute bzw. relative Abweichung konnte mit den nachfolgenden Formeln ermittelt werden:

$$\bar{A}_{abs} = \sqrt{\frac{1}{n * (n - 1)} * \sum \sum (v_{i,j} - v_{i,ideal})^2} \quad (2.1)$$

$$\bar{A}_{rel} = \sqrt{\frac{1}{n * (n - 1)} * \sum \sum \frac{(v_{i,j} - v_{i,ideal})^2}{v_{i,ideal}^2}} \quad (2.2)$$

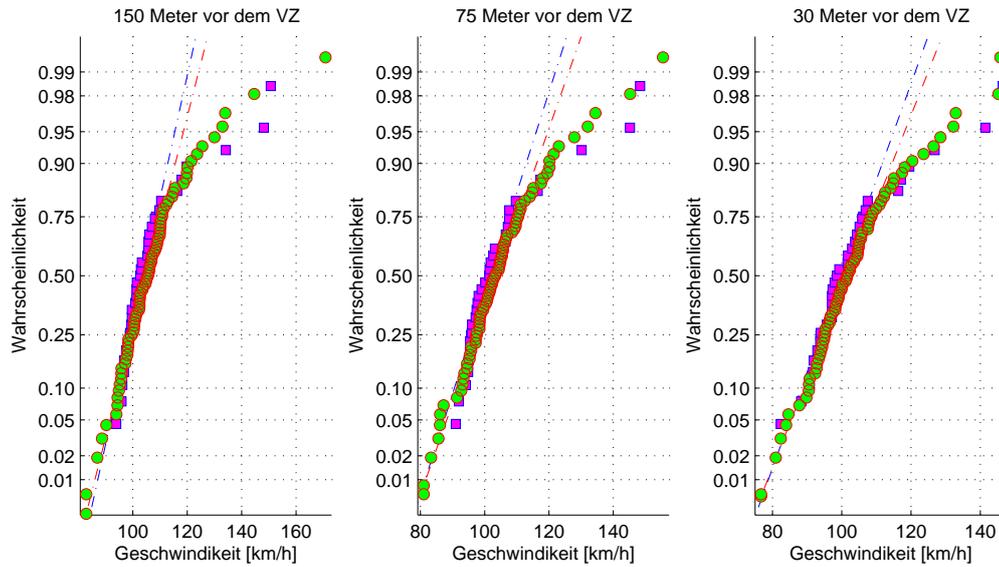


Abbildung 2.11: Gegenüberstellung der beiden Gruppen via Normplot. Gegenüberstellung der beiden Gruppen via Normplot. (Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker)

	Kontrollgruppe		Experimentalgruppe	
	A_{abs} [km/h]	A_{rel} [%]	A_{abs} [km/h]	A_{rel} [%]
Autobahnabfahrt	0,55	0,87	0,42	0,67
Landstraße	0,94	1,28	0,77	1,04
Ortsgebiet	0,39	0,88	0,31	0,69

Tabelle 2.2: Ohne Warnung: Absolute und relative Abweichung von der Normkurve

mit $i \dots 1 \leq i \leq \text{Anzahl an Messpunkten}$
 und $j \dots 1 \leq j \leq \text{Anzahl an Anfahrten}$
 und $n = \text{Anzahl an Anfahrten} * \text{Anzahl an Messpunkte}$

In beiden Tabellen (Tabelle 2.2 und 2.3) bzw. für beide Arbeitsmodi sind die Anfahrten der Experimentalgruppe im Schnitt näher an der Normkurve als die der Kontrollgruppe. Eine deutliche Optimierung des Fahrverhaltens aufgrund der VZA-Funktion lässt sich aber aus diesen Ergebnissen nicht ableiten.

2.5.5 Vergleich der Versuchsgruppen

Ein direkter Vergleich der beiden Versuchsgruppen kann mit der gerade präsentierten Darstellung nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Plot, bestehend aus den Mittelwerten und Standardabweichungen der selben Geschwindigkeitsverläufe, erstellt (Abbildung 2.12). An diesem Verkehrszeichen fährt die Testgruppe im Schnitt um ca. 3 km/h langsamer als die Kontrollgruppe. Diese Feststellung konnte bei anderen VZ leider nicht bestätigt werden. Siehe dazu auch die Plots im Appendix B.

	Kontrollgruppe		Experimentalgruppe	
	\bar{A}_{abs} [km/h]	\bar{A}_{rel} [%]	\bar{A}_{abs} [km/h]	\bar{A}_{rel} [%]
Autobahnabfahrt	0,86	1,36	0,63	1,01
Landstraße	1,47	2,0	0,93	1,26
Ortsgebiet	0,44	1,02	0,31	0,75

Tabelle 2.3: Mit Warnung: Absolute und relative Abweichung von der Normkurve

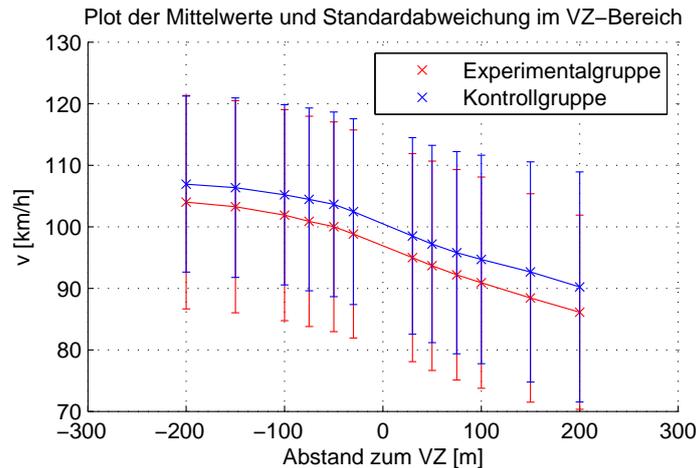


Abbildung 2.12: VZA-Auswertung: Vergleich der beiden Versuchsgruppen.

2.5.6 Zeitlicher und Räumlicher Abstand zum Verkehrszeichen

Ein mögliche Erklärung für die unerwartet schlechte Wirksamkeit der VZA wäre eine (zu) späte Anzeige der Verkehrszeichen im Fahrzeug. Ein Proband kann sein Fahrverhalten natürlich nur dann frühzeitig auf das neue Tempolimit anpassen, wenn die dazu benötigte Information auch rechtzeitig im Fahrzeug präsent ist. Um dies zu überprüfen, wurden die im Ablaufdiagramm 2.4 in gelb eingezeichneten Log-Einträge verwendet. Es wurden dabei sowohl der Zeitpunkt des VZ-Match¹² sowie auch der Zeitpunkt des HMI-Auftrages¹³ validiert. Die dazu erstellten Plots zeigen sowohl den zeitlichen als auch den räumlichen Abstand zwischen Fahrzeug und Verkehrszeichen zum Zeitpunkt des entsprechenden Logeintrags. Abbildung 2.13 stellt den im Zuge der Auswertung des bereits bekannten Verkehrszeichens erstellten Plot dar. Man erkennt, dass die Verkehrszeichen rechtzeitig verarbeitet und zur Anzeige gebracht werden. Es wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen Ausreißern und spät bzw. früh zur Anzeige gebrachten VZ besteht. Es konnte dazu aber keine Korrelation in den Daten nachgewiesen werden.

¹²Für alle Verkehrszeichen, die die einzelnen Filterstufen überstehen, wird ein solcher Logeintrag erstellt. Siehe dazu auch Kapitel 2.2.3

¹³Die AU wird beauftragt, das Verkehrszeichen am simTD-Screen entsprechend den berechneten Parametern anzuzeigen

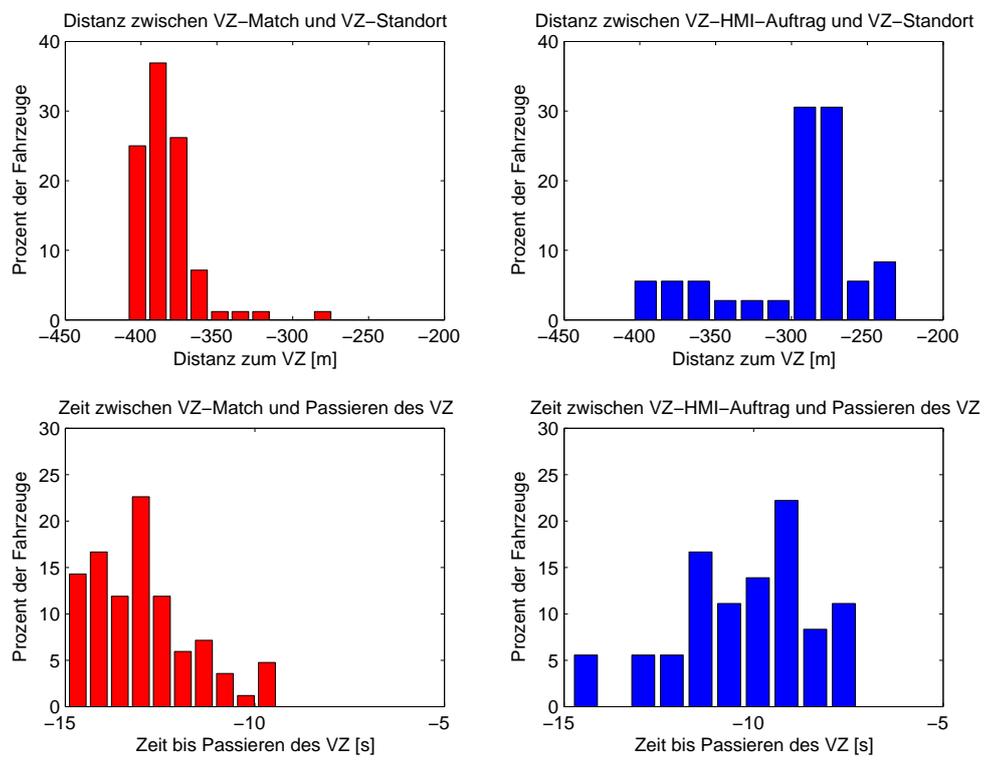


Abbildung 2.13: VZA-Auswertung: räumlicher und zeitlicher Abstand zum VZ.

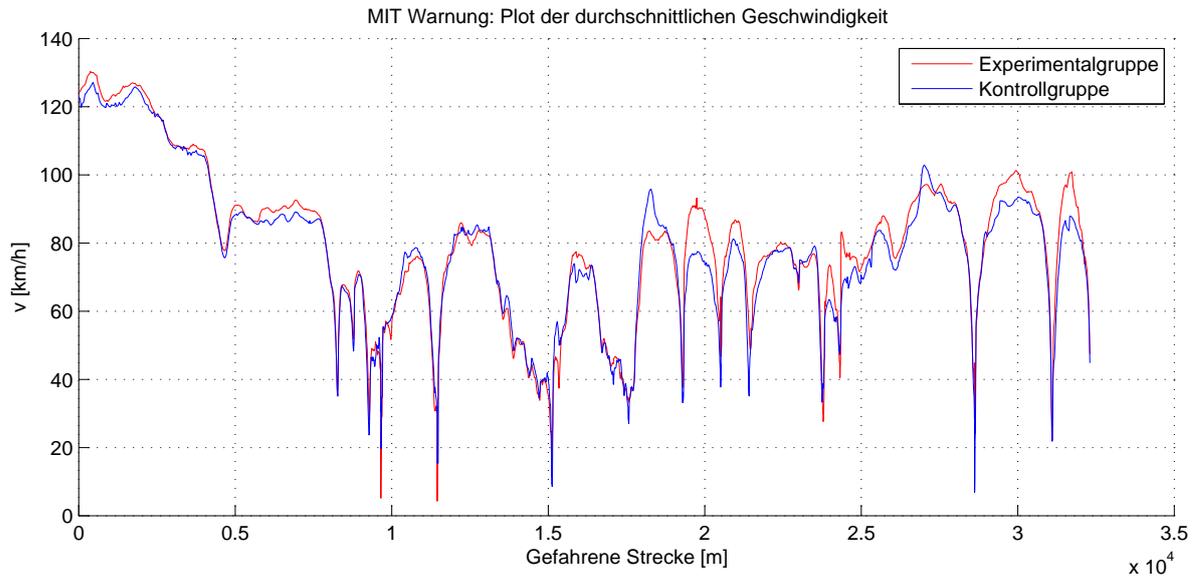


Abbildung 2.14: Vergleich der beiden Versuchsgruppen über eine ca. 30 km lange Strecke.

2.5.7 Langstrecke: Vergleich zwischen den Versuchsgruppen

Die bisher präsentierten Auswertungen und Plots wurden für mehrere Verkehrszeichen entlang der Versuchsstrecke erstellt und validiert. Aus den erhaltenen Ergebnissen konnte keine eindeutige Aussage abgeleitet werden. Grundsätzlich war kaum ein Unterschied zwischen den durchschnittlichen Geschwindigkeitsverläufen der beiden Versuchsgruppen erkennbar.

Um zu zeigen, dass diese unscharfen Ergebnisse auch für eine längere Strecke bestätigt werden können, wurde aus den Logdaten eine ca. 30 minütige Fahrtstrecke extrahiert und ausgewertet. Dies entspricht einer Fahrtstrecke von etwas über 30 Kilometer Länge. Abbildung 2.14 zeigt die Gegenüberstellung der beiden Versuchsgruppen. Es wurden, wie auch schon bei den Plots zuvor, die Mittelwerte der Geschwindigkeitsverläufe berechnet und anschließend in einem Diagramm aufbereitet. Man erkennt sehr gut, dass auch in diesem Diagramm keine eindeutige Verbesserung/Veränderung des Fahrverhaltens durch das VZA-System (Warnung bei Nichtbeachtung der geltenden Verkehrsregelung war aktiviert) eingetreten ist.

2.5.8 Die Update-Rate der IVS-VZ-Datenbank

Eine weitere mögliche Fehlerquelle wären veraltete VZ-Daten in der Fahrzeugdatenbank aufgrund von fehlenden VZ-Updates. Um dies auszuschließen, wurde die Update-Rate der Fahrzeuge berechnet. Man geht davon aus, dass während des Versuches beinahe jeden Tag ein Update durchgeführt wird. Aus den Logdaten sollte eine genäherte Update-Rate ermittelt werden. Tabelle 2.4 zeigt das erhaltene Ergebnis.

Circa dreimal pro Stunden wurden Verkehrszeichendaten vom Server geholt. Dies ist eine unerwartet hohe Update-Rate. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass eine Übertragung nicht vollständig durchgeführt werden konnte und daher zu einem späteren Zeitpunkt

betrachteter Zeitraum	148 h
Anzahl an Updates	55
Update-Rate	2,7 Updates/h
durchschnittliche Anzahl an geladenen VZs pro Updatevorgang	101,7

Tabelle 2.4: Erhaltene Ergebnisse bei der Auswertung der Update-Rate.

versucht wurde, erneut ein Update durchzuführen. Leider konnte hierzu keine genauere Begründung gefunden bzw. eine mögliche Fehlerquelle mit Hilfe der Logdaten identifiziert werden.

An den ausgewerteten VZ wurden die Logs (beinahe 1000 Verkehrssituationen) überprüft, um sicherzustellen, dass keine veralteten bzw. falschen Tempolimits im Fahrzeug angezeigt wurden. Dabei wurde kein einziger falscher bzw. veralteter Eintrag gefunden und es kann wohl davon ausgegangen werden, dass zumindest ein Großteil aller Verkehrszeichen im Fahrzeug korrekt abgelegt waren.

2.5.9 Die VZA-Arbeitsmodi im Vergleich

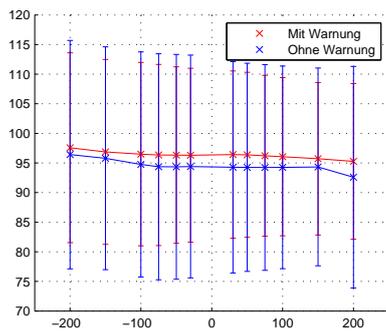
Alle bisher betrachteten Auswertungen wurden für beide Arbeitsmodi durchgeführt und aufbereitet. Zuletzt soll nun ein direkter Vergleich der beiden Arbeitsmodi erfolgen. Abbildung 2.15 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe an vier verschiedenen VZ-Standorten. In allen Situationen fährt die Gruppe mit aktivierter Warnung im Schnitt etwas schneller, als die Versuchsgruppe ohne Warnung.

2.5.10 Interpretation der Ergebnisse

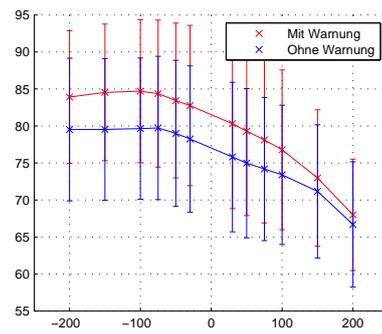
Die Wirksamkeit der VZA ist sehr schwer zu bewerten. Die evaluierten Daten zeigen aber keine signifikante Verbesserung des Fahrverhaltens durch das VZA-System. Diese Feststellung gilt sowohl für die Funktion mit Warnung bei Nichtbeachtung der geltenden Verkehrsregelung als auch für den Arbeitsmodus ohne Warnung. Die Wirksamkeit dieses Systems ist daher wohl in Frage zu stellen und es müssen geeignete Maßnahmen zur Steigerung der Systemakzeptanz bzw. zur Verbesserung der Usability erarbeitet werden.

Aus technischer Sicht wurden die Anforderungen an das System weitestgehend erfüllt. Probleme traten teilweise bei den Updates der VZ-Daten auf. Bei Wechselverkehrszeichen kam es in einigen Fällen zu recht hohen Latenzzeiten, die im schlimmsten Fall dazu führen konnten, dass die im Fahrzeug zur Anzeige gebrachten VZ nicht mehr mit den geltenden Tempolimits übereinstimmten.

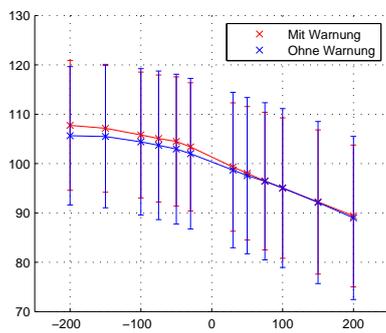
Aus nicht-technischer Sicht konnten auch einige störende Nebeneffekte ausgemacht werden. Die Position des simTD-Displays lag nicht im direkten Sichtfeld des Fahrers. Somit musste der Fahrer eine bewusste Kopfbewegung Richtung Display durchführen und damit auch für kurze Zeit die Verkehrssituation vor dem Fahrzeug außer Acht lassen. Dies ist für ein informierendes System eher von Nachteil. Besser wäre natürlich, wenn VZA-Informationen im direkten Sichtfeld des Fahrers (z.B.: im Head-up-Display) angezeigt würden. Dies würde bei einer Serieneinführung eines solchen Systemes wohl auch so eingeplant. Abbildung 2.16 zeigt das Cockpit des Versuchsfahrzeuges aus der Sicht des Fahrers. Das simTD-Display wurde mit einer grünen Ellipse gekennzeichnet.



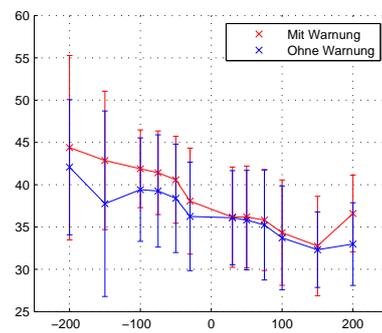
Autobahn: Konstantes Tempolimit 100 km/h.



Autobahnabfahrt: Neues Tempolimit 60 km/h.



Landstraße: Neues Tempolimit 70 km/h.



Ortsgebiet: Neues Tempolimit 30 km/h.

Abbildung 2.15: Gemittelte Geschwindigkeitsverläufe an verschiedenen VZ: Die Arbeitsmodi im Vergleich

In manchen Versuchsfahrzeugen war neben dem simTD-VZA auch noch ein serienmäßiger (Kamera-basierter) Verkehrszeichenassistent verbaut und aktiv. Dies könnte ein weiterer negativer Einflussfaktor sein, da es laut Auskunft der Testfahrer einige Male zu widersprüchlichen Anzeigen im Fahrzeug kam. Dies führte dazu, dass die Funktionalität des Systems von einigen Probanden angezweifelt und deshalb möglicherweise die VZA-Anzeigen nicht genug beachtet/ernst genommen wurden.

An einigen Geschwindigkeitsverläufen kann man erkennen, dass sich manche Probanden nicht an die Versuchsvorgaben gehalten und etliche Tempolimits nicht beachtet haben. Man muss also leider davon ausgehen, dass das Verhalten von manchen Testfahrern nicht repräsentativ ist und die angezeigten Informationen absichtlich nicht beachtet bzw. die geltenden Tempolimits nicht eingehalten wurden. Die Daten aus einer Befragung der Fahrer direkt nach Versuchsende könnten bei der Auswertung sehr hilfreich sein. Damit könnte zum Beispiel überprüft werden, ob die etwaigen Warnungen vom Fahrer überhaupt wahr- bzw. ernst genommen wurden. Leider standen für diese Art der Auswertung keinerlei Daten zur Verfügung.



Abbildung 2.16: Aufnahme aus der Sicht eines simTD-Fahrers

Kapitel 3

Querverkehr-Assistenz in simTD

Im Verkehrsbericht des Deutschen Statistischen Bundesamtes aus dem Jahre 2011 wird der „*Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt*“ mit 33,8 Prozent als die häufigste Unfallart innerhalb von Ortschaften angeführt [Des12]. Oder anders formuliert: Jährlich kommt es in Deutschland zu ca. 42000 Verkehrsunfällen im Kreuzungsbereich und dabei werden über 150 Personen getötet.

Um dem entgegen zu wirken, wird im Zuge des simTD-Projektes ein Kreuzungs- und Querverkehrsassistenzsystem getestet, das in Zukunft helfen soll, einen Teil dieser Unfälle zu vermeiden und damit möglicherweise Leben zu retten. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden Tools und Skripte erstellt, die die Funktionsentwickler durch eine automatisierte Datensammlung (Sensor- und Parameterdaten zur aktuellen Verkehrssituation im Kreuzungsbereich) bei der Auswertung der Logdaten unterstützen sollen.

3.1 Funktionsbeschreibung

Die simTD-Funktion Kreuzungs- und Querverkehrsassistenz (QVA) informiert bzw. warnt den Fahrer im Falle einer möglichen Kollision mit Abbiege- oder Querverkehr (LKW, PKW, Motorräder) an Kreuzungen und Einmündungen. Während der Annäherung an eine Kreuzung wird der Fahrer zunächst von der in Kapitel 2 vorgestellten Funktion VZA auf die vorherrschende Vorfahrtregelung bzw. auf eine etwaige Wartepflicht hingewiesen.

Ist die vorausliegende Kreuzung nicht durch eine Lichtsignalanlage (Ampel) geregelt, überwacht die QVA alle anderen in die Kreuzung einfahrenden, möglicherweise querenden Fahrzeuge auf mögliche Kollisionsgefahr mit dem Ego-Fahrzeug. Diese Fahrzeuge werden in einer Umfeldtabelle abgelegt und den jeweiligen Fahrbahnen und nach Möglichkeit auch dem genauen Fahrstreifen zugeordnet. Im nächsten Schritt werden die betroffenen Kollisionsbereiche ermittelt und die zugehörigen Eintritts- und Austrittszeiten berechnet. Wenn eine Kollisionsgefahr mit einem querenden, vorfahrtberechtigten Fahrzeug detektiert wird und noch keine Anhalteabsicht des Ego-Fahrzeugs erkennbar ist, wird als erste Warnstufe ein symbolisches, von links bzw. rechts querendes Fahrzeug auf dem HMI-Display angezeigt. Erfolgt weiterhin keine Anpassung des Fahrverhaltens seitens des Fahrers bzw. ist immer noch keine ausreichende Anhalteabsicht detektierbar, kann eine zweite Warnstufe mit optischer und akustischer Warnung aktiviert werden. Diese Warnstufe ist so parametrisiert, dass der Fahrer danach bei normaler Reaktionszeit und einer angenommenen

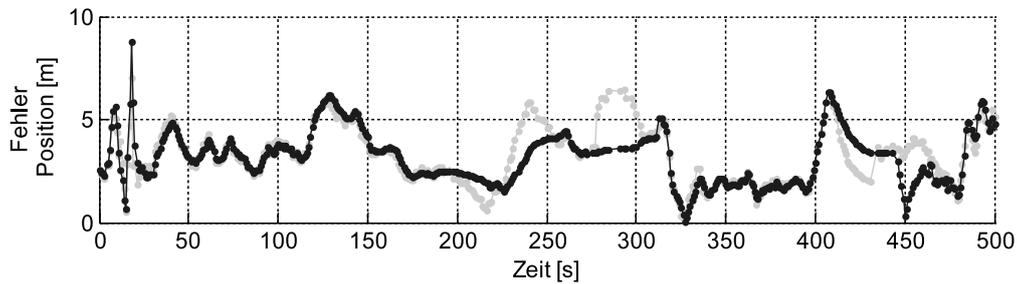


Abbildung 3.1: Positionsgenauigkeit des GPS-Empfängers. Graue Kurve ohne Filter; Schwarze Kurve mit Filter

Bremsverzögerung von 7 m/s^2 das Fahrzeug noch rechtzeitig vor der Halte- bzw. Sichtlinie zum Stehen bringen kann. Die Anhalteabsicht wird ebenso wie eine etwaige Abbiegeabsicht von der Systemkomponente „Fahrerverhaltensvorhersage“ geschätzt [EZN12].

3.1.1 GPS-Positionsgenauigkeit

Die Bestimmung der befahrenen Fahrbahn bzw. des Fahrstreifens erfordert eine möglichst genaue Positionierung des Fahrzeugs. Diese Kenngröße beeinflusst direkt die Güte aller von der GPS-Position abhängigen simTD-Funktionen. Aus diesem Grund wurde die Genauigkeit des GPS-Empfängers im Vorfeld evaluiert [SZA13]. Abbildung 3.1 zeigt den aufgezeichneten RMS¹-Fehler über einen Zeitraum von 500 Sekunden.

Das Ergebnis der Auswertung kann der Tabelle 3.1 entnommen werden. Es wurde dabei der RMS-Fehler der Position und des Kurswinkels ohne bzw. mit nachgeschaltetem Filter² ermittelt. Der Fehler des GPS-Kurswinkels ist bei der Auswertung der gesamten Messfahrt nur bedingt aussagekräftig, da bei einem Ein-Antennensystem im Stand keine sinnvolle Evaluierung vorgenommen werden kann. Aus diesem Grund ist in der zweiten Spalte der Tabelle zusätzlich der RMS-Wert für Zeitabschnitte, bei denen die Geschwindigkeit des Fahrzeugs mehr als 15 km/h betrug, angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Filterung die Genauigkeit des Kurswinkels bei langsamer Geschwindigkeit stark verbessert werden kann. Auf die Positionsgenauigkeit hat die Filterung jedoch kaum einen Einfluss. Als Erklärung für den nur geringfügigen Genauigkeitsgewinn des Filters wird vermutet, dass der GPS-Receiver, entgegen ursprünglicher Spezifikation (keine interne Filterung), bereits intern eine Filterung durchführt.

RMS-Fehler	Gesamt	$v > 15 \text{ km/h}$
Position GPS[m]	3,06	2,96
Position Filter[m]	2,96	2,86
Kurswinkel GPS[°]	21,14	1,41
Kurswinkel Filter[°]	1,35	1,27

Tabelle 3.1: RMS-Fehler für Position und Kurswinkel.

¹Root Mean Square

²siehe dazu auch 1.6.1

3.1.2 Beschreibung der Kreuzung mittels Kollisionsbereichen

Die QVA-Funktion benötigt eine sehr genaue Beschreibung der vorliegenden Kreuzungstopologie um die Gefährdung durch andere Fahrzeuge im Kreuzungsbereich abschätzen zu können. Dazu müssen die Fahrspuren und die zugehörigen Kollisionsbereiche einer Kreuzung ermittelt und diese Daten der QVA-Funktion, in simTD als XML-Datei, zur Verfügung gestellt werden.

Abbildung 3.2 zeigt die Modellierung von Fahrspuren und Kollisionsbereichen einer einfachen, dreiarmligen Kreuzung. Im linken Bild wird eine Annäherung aus nördlicher Richtung angenommen (grün eingefärbte Fahrspur). Das Fahrzeug hat zwei Möglichkeiten (rechts abbiegen oder gerade aus weiter) die Kreuzung zu verlassen (blau eingefärbte Fahrspuren). Aus diesen Beobachtungen können nun relevante Kollisionsbereiche abgeleitet werden (blau markierte Flächen im Kreuzungszentrum). Dies sind also jene Bereiche, in denen es zu Kollisionen mit dem Querverkehr kommen könnte.

In Abbildung 3.3 sind die Fahrspuren und Kollisionsbereiche einer weit komplexeren Kreuzung, der Hauptkreuzung am simTD-Testgelände Friedberg (siehe dazu auch Abbildung 3.5), dargestellt.

Die Beschreibung von Kreuzungen ist in dieser Form sehr aufwendig und müsste vor serienmäßiger Einführung des QVA-Systems für alle deutschen Kreuzungen erfolgen. Es gibt jedoch bereits Ideen und Ansätze, wie solche Topologien automatisiert erstellt werden könnten [ES13].

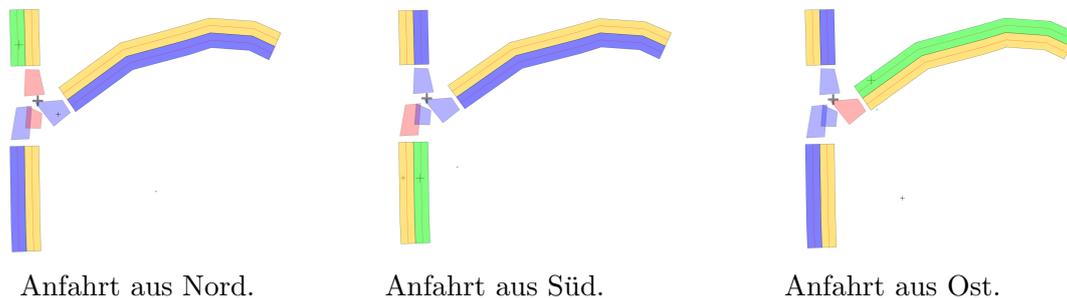


Abbildung 3.2: Relevante Fahrspuren und Kollisionsbereiche

3.2 Beschreibung der Testumgebung

Im Rahmen des simTD-Projektes wurden zur Erprobung der C2X-Funktionen einige öffentliche Straßenabschnitte zu Teststrecken aufbereitet. Die Erprobung von einigen Funktionen, darunter auch die QVA, im öffentlichen Straßenverkehr war aus Sicherheitsgründen nicht möglich und musste auf einem abgeschlossenen Gelände, das nur mit simTD-Fahrzeugen befahren werden durfte, durchgeführt werden.

3.2.1 Testgelände Friedberg

Aus oben angeführten Gründen war es notwendig, ein Testgelände aufzubauen, um die gesamte simTD-Funktionalität mittels Fahrversuchen erproben und evaluieren zu können.

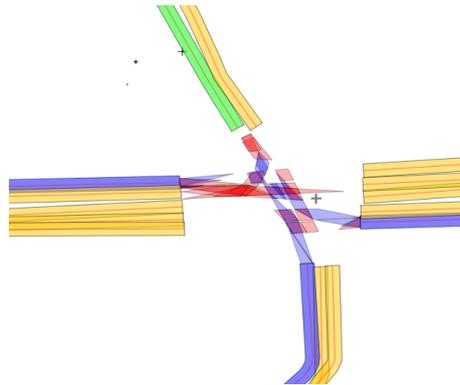


Abbildung 3.3: Relevante Fahrspuren und Kollisionsbereiche der Hauptkreuzung am Testgelände Friedberg.



Abbildung 3.4: Übersicht über die ehemalige Kaserne Friedberg mit eingezeichneter Spurführung.

Hierzu wurde die ehemalige US-Kaserne Friedberg mit der entsprechenden Hardware ausgestattet und eine Teststrecke mit zugehörigen Bodenmarkierungen aufgebaut.

3.2.2 Verkehrsführung und Testablauf

Die Abbildung 3.4 zeigt eine grobe Übersicht über das Testgelände in Friedberg und die gewählte Spurführung am Gelände. Für die nachfolgenden Betrachtungen ist es wichtig, die herrschende Verkehrsführung und die Vorrangsregelung zu kennen. Grundsätzlich ist die zweispurige Straße in West-Ost-Ausrichtung als Vorrangstraße geführt. An der Kreuzung im Süd-Westen ist aus Norden kommend nur Rechtsabbiegen erlaubt (siehe Abbildung 3.5). Während der Versuchsdurchführung galt grundsätzlich „Freies Fahren“ im Testgelände. Die Fahrer wurden dabei in zwei Gruppen, Experimental- und Kontrollgruppe, eingeteilt. Bei der Experimentalgruppe wurden zwei verschiedene Warnzeitpunkte getestet und daher wurde diese Gruppe entsprechend aufgeteilt:

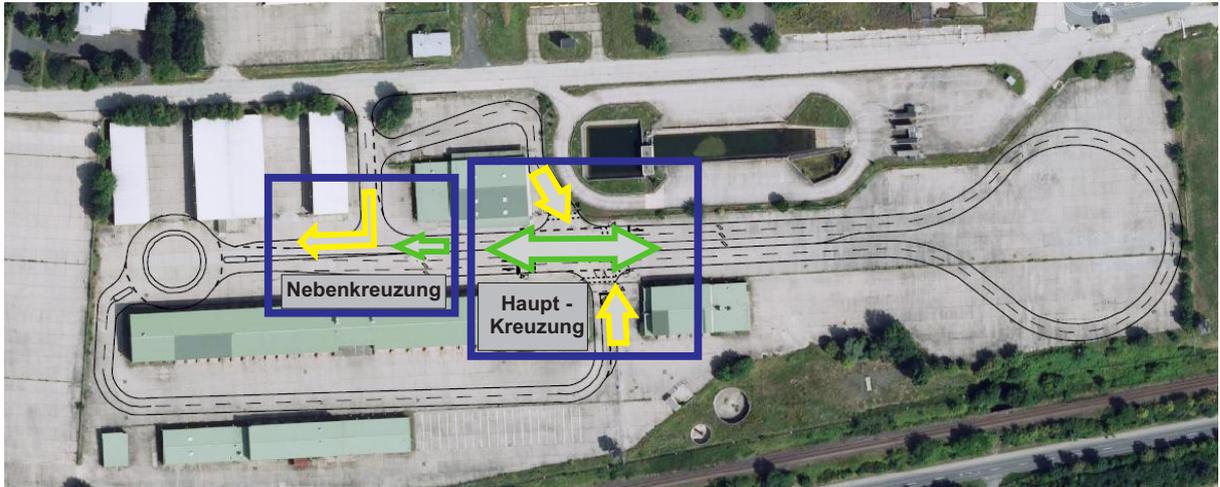


Abbildung 3.5: Verkehrsführung am Testgelände Friedberg

1. Kontrollgruppe: Keine visuellen oder auditiven Warnungen; Keine Anzeigen am simTD-Display;
2. Experimentalgruppe: Visuelle und auditive Warnungen
 - (a) frühe Warngruppe: $TTA^3 = 0,8 \text{ s}$
 - (b) späte Warngruppe: $TTA = 0,2 \text{ s}$

3.3 Der QVA-Warnalgorithmus

In diesem Abschnitt wird kurz auf den in simTD verwendeten Warnalgorithmus eingegangen und die einzelnen Bewertungsschritte beschrieben.

Um nicht unnötig CPU-Ressourcen zu verbrauchen, wird die Querverkehrsassistenz erst aktiviert, wenn sich das Ego-Fahrzeug einem Kreuzungsbereich nähert und wieder deaktiviert, sobald das Fahrzeug den Bereich verlässt. Es wird nur in Situationen gewarnt, in denen das Ego-Fahrzeug dem Fremdfahrzeug Vorfahrt gewähren müsste und dies aus dem Fahrverhalten nicht ersichtlich ist. Eine Warnung wird dabei immer nur in den Fahrzeugen mit Wartepflicht (Vorrang gewähren) generiert und angezeigt.

3.3.1 Die Kollisionsbereichsauswertung

Für alle Fremdfahrzeuge, die sich in der Nähe des Ego-Fahrzeugs und damit auch in dessen Umfeldtabelle befinden, wird in weiterer Folge eine Kollisionsbereichsauswertung durchgeführt. Dabei werden Fahrzeuge, die den Kollisions- bzw. den Kreuzungsbereich bereits durchquert haben, nicht weiter betrachtet.

Für die restlichen Fahrzeuge werden relevante Kollisionsbereiche, also Kollisionsbereiche, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vom Ego- als auch vom Fremdfahrzeug

³time to avoidance

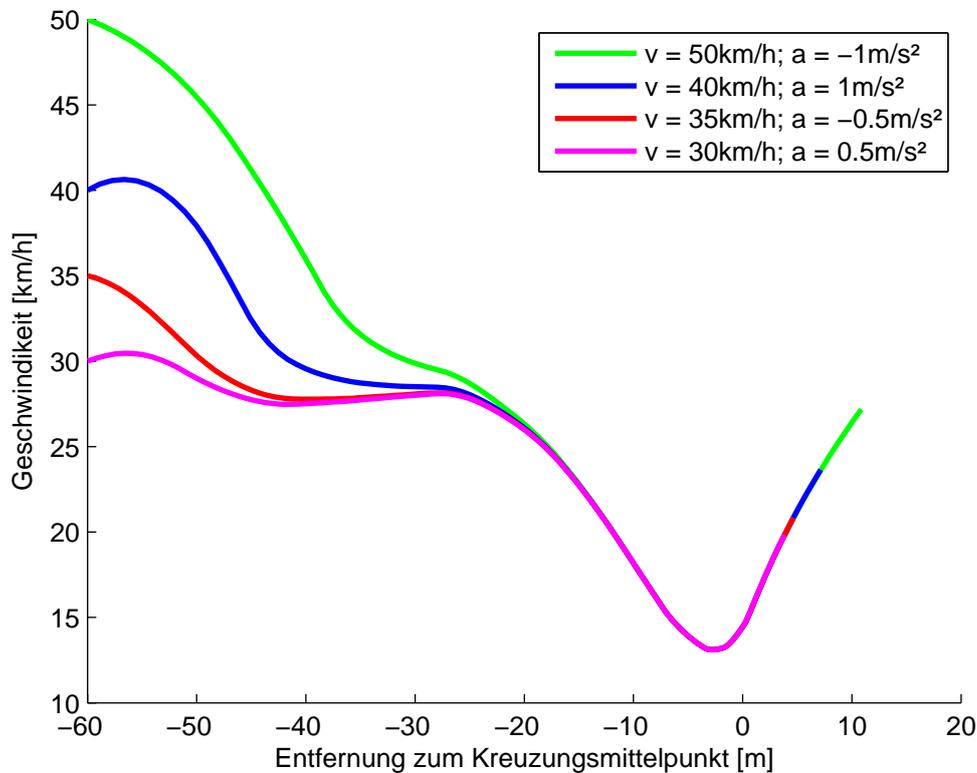


Abbildung 3.6: Nach [LBKS12] modellierte Geschwindigkeitsverläufe bei Annäherung an eine Kreuzung.

befahren werden, bestimmt. Anschließend werden für beide Fahrzeuge die Distanzen zu den Bereichen an sich und zudem die Wegstrecke, welche sie im Kollisionsbereich zurücklegen müssen, ermittelt.

3.3.2 Prädiktion der Zeiten zum Kollisionsbereich

Mit Hilfe der aktuellen Fahrzeug- und den Entfernungsdaten aus dem letzten Abschnitt werden die Eintritts- und Austrittszeiten der Fahrzeuge für alle relevanten Kollisionsbereiche bestimmt.

Dabei wird angenommen, dass die Fremd-Fahrzeuge sich mit ihrer aktuellen Geschwindigkeit und Beschleunigung weiterbewegen.

Für das Ego-Fahrzeug wird das in [LBKS12] beschriebene Geschwindigkeitsmodell verwendet. Abbildung 3.6 zeigt mehrere Geschwindigkeitsverläufe, die aus dem eben erwähnten Modell generiert wurden.

3.3.3 Der Kollisionsindikator

Mit Hilfe der Eintritts- und Austrittszeiten kann berechnet werden, ob sich das Ego- und das Fremdfahrzeug zeitgleich in einem Kollisionsbereich befinden. Dabei ist die Kollisions-

wahrscheinlichkeit umso höher, desto mehr sich die beiden Intervalle überschneiden (Aus der Länge der Zeitspanne, in der sich beide Fahrzeuge im Kollisionsbereich aufhalten, ergibt sich die Kollisionswahrscheinlichkeit). Die Positionsungenauigkeit der Fahrzeuge wird bei der Berechnung ebenfalls mit berücksichtigt.

3.3.4 Warnlevel und Warnentscheidung

Für jedes Fremdfahrzeug mit einem ausreichend großen Kollisionsindikator wird die Zeit (Warnzeit, TTA) berechnet, in der eine Warnausgabe dazu führen kann, dass die Kollision verhindert wird. Diese Zeit setzt sich zusammen aus der Reaktionszeit des Fahrers und der Zeit, die benötigt wird, um das Fahrzeug bis in den Stillstand zu bremsen.

Abhängig von dieser Warnzeit (frühe Warngruppe vs. späte Warngruppe, siehe Abschnitt 3.2.2) werden die entsprechenden Warnlevel (Info- oder Warnstufe) definiert.

Ist also der Warnindikator groß genug und die Warnzeit TTA unter der vordefinierten Schwelle, wird vom System eine Warnung generiert.

3.4 QVA-Logdaten

Abschnitt 1.5.4 beschreibt die Aufbereitung der Log-Daten. Zur Veranschaulichung der Situationen wurde zusätzlich ein Tool zur grafischen Aufbereitung der gefilterten Daten implementiert. Abbildung 3.7 zeigt den Screenshot einer mit dem Tool nachgestellten Kreuzungssituation. Der Ablauf kann aus den Logdaten rekonstruiert und als Grundlage einer manuellen Bewertung der Kreuzungssituationen herangezogen werden.

3.5 Automatisierte Analyse von Kreuzungs-Situationen

Aufgrund der großen Datenmenge und natürlich auch der hohen Anzahl an interessanten Kreuzungssituationen musste ein Teil der Auswertung automatisch erfolgen können. Die gesammelten Fahrzeugparameter und Kreuzungsdaten können bei der Auswertung von heiklen oder unklaren Situationen (bei denen vom System eine Warnung ausgegeben wurde) herangezogen werden.

3.5.1 Verwendetes Auswerte-Template

In Zusammenarbeit mit BMW F+T wurden wichtige bzw. interessante Parameter identifiziert (siehe Tabelle 3.2) und entsprechend in ein Template-File eingearbeitet.

3.5.2 Identifikation der betroffenen Kreuzung

Der erste wichtige Schritt zur automatisierten Auswertung war die Festlegung bzw. die Identifikation des Bereiches, indem sich die vom Warn-Algorithmus erkannte gefährliche Situation ereignet hat. Dazu gibt es in den Logdaten einen entsprechenden Eintrag, der sich aber im Zuge der Auswertung als etwas unsicher herausgestellt hat. Deshalb wurde zusätzlich dazu ein weiterer Weg implementiert, um diese Information aus den Logdaten extrahieren zu können.

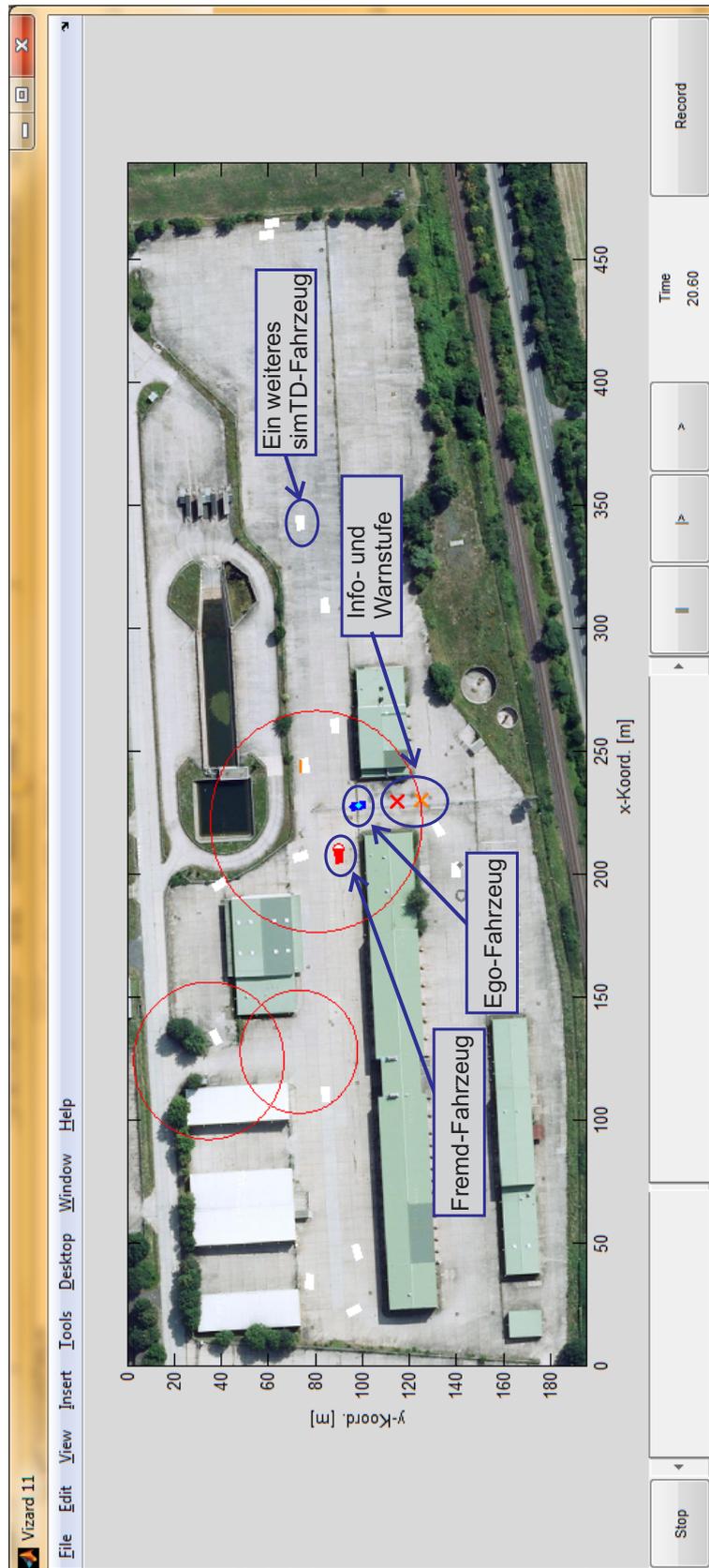


Abbildung 3.7: Screenshot des grafischen Auswertetools.

Parameter	Beispiel	Beschreibung
Kreuzung	HK	Gibt an, wo sich die Fahrsituation ereignet hat
Fahrtrichtung Ego/Fremd	N-S	Fahrtrichtung des Ego-/Fremd-Fahrzeugs
Blinker Ego/Fremd	[OFF/L/R]	Wurde der Blinker im Ego-/Fremd-Fahrzeug bei Annäherung an die Kreuzung betätigt?
Blinker Ego/Fremd(twarn)	[OFF/L/R]	War der Blinker im Ego-/Fremd-Fahrzeug zum Warnzeitpunkt aktiviert?
Warnung vor/nach Min(v)	[V/N]	Minimum der Geschwindigkeit vor oder nach der Warnung?
d(twarn)	12 m	Abstand des Ego-Fahrzeugs zum Konfliktbereich zum Warnzeitpunkt
v(twarn)	4 m/s	Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs zum Warnzeitpunkt
acc(twarn)	-1 m/s ²	Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs zum Warnzeitpunkt
min(acc)	-1 m/s ²	Maximale Verzögerung des Ego-Fahrzeugs bei Annäherung an die Kreuzung
gebremst	J/N	Wurde nach der Warnung gebremst? Wurde auch bis zum Stillstand gebremst?
Konfliktbereichsauswahl	74	vom System ausgewählter Konfliktbereich
min(TTA)	450 ms	Minimum der TTA (Time to avoidance) bei Annäherung an die Kreuzung

Tabelle 3.2: Wurde bei Annäherung des Ego-Fahrzeugs an die Kreuzung eine Warnung generiert, können aus den gesammelten Logdaten die angeführten Parameter automatisch ermittelt werden.

Zu diesem Zweck wurden kreisförmige Kreuzungsbereiche definiert und um den jeweiligen Kreuzungsmittelpunkt aufgespannt. Der passende Kreisradius wurde je nach Beschaffenheit der Kreuzung gewählt und dann über einen Teil der verfügbaren Datensätze verifiziert. Bei der Wahl des Radius bzw. dessen Verifikation musste darauf geachtet werden, dass mögliche Warnungen in dieser aufgespannten Kreisfläche auftreten, da dies eine Voraussetzung für die nachfolgende Auswerte-Toolkette darstellt. Die gewählten Kreuzungsbereiche wurden in Abbildung 3.7 als rote Kreise dargestellt.

Für die Identifikation der Kreuzung wurde nun zum Warnzeitpunkt die GPS-Position des Ego-Fahrzeugs mittels linearer Interpolation berechnet. Über die in 1.6.1 beschriebene Koordinatentransformation können die GPS-Koordinaten (globale Positionierung) in eine X-Y-Ebene (lokale Positionierung) überführt werden. Als Referenzpunkt für die Transformation werden die Kreuzungsmittelpunkte verwendet und somit liegt der Mittelpunkt der Kreuzung im Nullpunkt der aufgespannten X-Y-Ebene. Aus den berechneten x- und y-Werten des Fahrzeugs kann der Euklidische Abstand zu den einzelnen Kreuzungsmittelpunkten bestimmt und damit die betroffene Kreuzung identifiziert werden (Der Abstand zum Kreuzungsmittelpunkt zum Zeitpunkt der Warnung ist kleiner als der Radius des vor-



Abbildung 3.8: Beispiel für eine Warnsituation an der Hauptkreuzung.

definierten, kreisförmigen Kreuzungsbereiches). Zur Veranschaulichung siehe Abbildung 3.8.

3.5.3 Fahrtrichtung der Fahrzeuge bei Eintritt und Verlassen des Kreuzungsbereiches

Im vorigen Absatz wurde die betroffene Kreuzung identifiziert. Mit dieser Information kann nun die Fahrtrichtung der betroffenen Versuchsfahrzeuge beim Eintritt und natürlich ebenso beim Verlassen des Kreuzungsbereiches bestimmt werden. Dazu wird ausgehend von der Position zum Zeitpunkt der Warnung schrittweise die Position des Fahrzeugs vor bzw. nach dem Warnzeitpunkt bestimmt, in die X-Y-Ebene überführt, und schließlich die Distanz zum Kreuzungsmittelpunkt berechnet. Wird der Bereich verlassen, also die Distanz größer bzw. gleich dem gewählten Radius des Kreuzungsbereichs, kann das Heading des Fahrzeugs an dieser Stelle ausgewertet werden, um die Fahrtrichtung festzustellen.

Die Fahrtrichtung soll aber nicht in Grad (Heading), sondern als Haupthimmelsrichtung angegeben werden. Deshalb muss das Heading in einem letzten Schritt noch entsprechend umgewandelt werden. Dazu musste noch definiert werden, wie ein solcher Logeintrag in der Tabelle aussehen soll. Wird zum Beispiel eine Fahrtrichtung mit „N-W“ angegeben, so bedeutet dies, dass das Fahrzeug aus nördlicher Richtung kommend in den Bereich eingefahren ist und es den Bereich in westlicher Richtung wieder verlassen hat. Entsprechend des eben genannten Beispiels kann nun das Heading in eine Himmelsrichtung überführt werden. Siehe dazu Abbildung 3.9.

3.5.4 Berechnung der fehlenden Parameter

Die angeführte Tabelle 3.2 beinhaltet noch einige Felder, die allesamt durch Interpolation und teilweise durch darauffolgende Minimum-Bildung von Sensordaten berechnet und somit mit sehr geringem Aufwand aus den Logdaten extrahiert werden konnten. Hier war

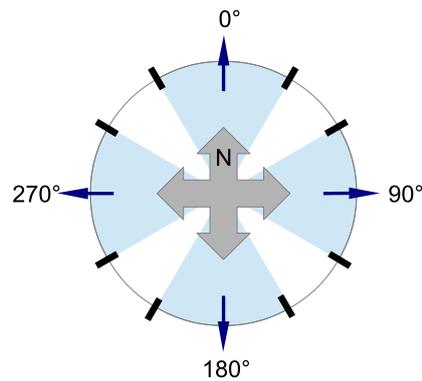


Abbildung 3.9: Zuordnung von Heading auf eine Himmelsrichtung.

nur darauf zu achten, mögliche NAN⁴-Einträge zu beseitigen bzw. bei der Interpolation nicht zu verwenden.

3.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die automatische Datenauswertung der simTD-Funktion Querverkehr-Assistenz besprochen. Die dabei implementierten Auswerteskripte wurden der BMW F+T zur weiteren Aus- und Bewertung der Logdaten zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse dieser Evaluierung standen zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht zur Verfügung.

Die QVA-Logdaten wurden als Datenbasis für das im nächsten Kapitel vorgestellte Kreuzungsassistenzsystem herangezogen. Die von der QVA generierten und von den Versuchsfahrern als gerechtfertigt gekennzeichneten Warnungen werden dabei als True Positives angesehen. Im Abschnitt 4.3 werden diese Daten auf das implementierte System angewendet und die Ergebnisse entsprechend interpretiert.

⁴not a number

Kapitel 4

Implementierung eines Kreuzungsassistenzsystems

Im letzten Kapitel wurde die simTD-Querverkehrsassistenz vorgestellt. Diese Funktion benötigt sehr viele verschiedene Eingangsdaten wie hochgenaue digitale Karten und Informationen zur Kreuzung (Spurführung, Kollisionsbereiche, usw.).

In den USA wird ein anderer Ansatz verfolgt. Das verwendete C2X-System kommt ohne Zusatzdaten (z.B.: Kartenmaterial) aus und arbeitet mit einem Low-Cost-GPS-Gerät in Verbindung mit einer C2X-Kommunikationseinheit. Das System ist also einfacher strukturiert bzw. aufgebaut und aus diesem Grund auch kostengünstiger.

Im Zuge dieser Arbeit wurde auf dieser „Low-Cost“-Grundlage ein Kreuzungsassistenzsystem implementiert und mit der entsprechend aufwendigeren simTD-Variante verglichen. Dazu wurden die aus dem simTD-Versuch gewonnenen Logdaten als Eingangsdaten für den entworfenen Warnalgorithmus verwendet und die von den Versuchsfahrern als gerechtfertigt gezeichneten Warnungen als Referenz herangezogen. Dadurch konnten die FP- bzw. TP-Raten des implementierten Systems berechnet und die Funktion damit evaluiert werden.

Im Folgenden soll gezeigt werden, welche Auswirkungen der Verzicht auf Kartenmaterial und Beschreibung der Kreuzungstopologie insbesondere auf die Zuverlässigkeit des Systems haben.

4.1 State-of-the-art und technische Voraussetzungen

In diesem Abschnitt werden technische Grundlagen erörtert, verschiedene Trajektorien-Prädiktionsverfahren diskutiert und die für die Berechnung benötigten Koordinatensysteme vorgestellt.

4.1.1 Relative Positionierung

Am Beginn des Kapitels wurde bereits erwähnt, dass für die Positionierung ein Low-Cost-GPS-Empfänger zum Einsatz kommt. Man sollte daher davon ausgehen, dass mit einer schlechteren bzw. mit einer mit größeren Abweichungen behafteten Absolutposition gearbeitet werden muss.

Für die in den USA angestrebten C2X-Funktionen (z.B.: Blindspot detection, do-not-overtake-Warnung, usw.) und auch für die in dieser Arbeit präsentierte Kreuzungsassistent sind diese Abweichungen aber weniger kritisch. Es wird keinerlei Kartenmaterial verwendet und es muss auch keine Zuordnung des Fahrzeugs auf eine Straße oder gar eine Fahrspur durchgeführt werden.

Von Interesse sind lediglich die relativen Positionen der in der Nähe befindlichen Fremdfahrzeuge. Die relative Entfernung zwischen den betrachteten Fahrzeugen (vor allem wenn beide Fahrzeuge mit dem selben GPS-Empfänger ausgestattet sind) kann sehr viel genauer als die absolute Position ermittelt werden, da sich manche störende Umwelteinflüsse (z.B.: Ionosphären- und Troposphärenstörungen) in lokalen Bereichen auf beide Empfänger gleichermaßen auswirken.

4.1.2 Trajektorienprädiktion

Um mögliche Kollisionen frühzeitig erkennen zu können, müssen gefährlichen Situation vorhergesagt werden. Es muss also aus aktuellen Sensordaten eine möglichst genaue Vorhersage des Fahrtwegs getroffen werden. Für diese Vorhersage können natürlich beinahe beliebig viele Sensordaten verwendet werden, um eine möglichst zuverlässige Prädiktion zu treffen. Die nachfolgende Auflistung beinhaltet die wichtigsten Parameter:

- Heading des Fahrzeugs
- GPS-Positionsdaten
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Beschleunigung des Fahrzeugs
- Gierrate des Fahrzeugs

Die Trajektorienprädiktion ist eine sehr gut untersuchte Thematik und es gibt entsprechend viel Literatur (z.B. [Kla08], [MI09], [DBB03], [BWD07]), die sich mit verschiedensten Vorhersage-Modellen beschäftigt. Einige dieser Modelle und Ideen werden im Anschluss beschrieben.

Prädiktion mit dem Standard-Parametersatz

Zur Beurteilung des Kollisionsrisikos muss eine räumliche sowie eine zeitliche Trajektorienprädiktion durchgeführt werden. Zusätzlich ist die Bestimmung der Schnittpunkte der Trajektorien verschiedener Fahrzeuge erforderlich. Diese Prädiktionen lassen sich mit den im letzten Abschnitt aufgelisteten Parametern durchführen. Klanner [Kla08] verwendet dazu beispielsweise die bestehenden Winkelbeziehungen zwischen den zu untersuchenden Fahrzeugen und führt das Fremdfahrzeug mittels einer Koordinaten-Transformation in das sogenannte Eigenfahrzeugkoordinatensystem über. Aus der Gierrate der Fahrzeuge kann die Krümmung der befahrenen Kurve abgeleitet werden. Mit diesen Daten lässt sich nun der Schnittpunkt der Trajektorien mittels Fixpunkt-Iteration bestimmen. Bei Klanner [Kla08] wird anschließend ein Kollisionsbereich festgelegt und eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Fahrzeuge berechnet.

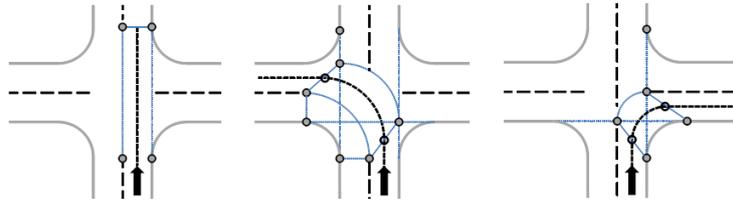


Abbildung 4.1: Mögliche Manöver: Kreuzen, Linkseinbiegen und Rechtseinbiegen.

Eine andere Möglichkeit der Prädiktion von räumlichen, stark vereinfachten Trajektorien, basiert auf charakteristischen Punkten der Kreuzungsgeometrie [MI09]. Dabei wird das Fahrerverhalten beobachtet und aus den erhaltenen Daten eine Manövervorhersage getroffen. Abbildung 4.1 zeigt die auf den Vorhersagen des Fahrerverhaltens beruhenden Trajektorien. Für diese Prädiktion muss natürlich eine entsprechende Karteninformation hinterlegt werden, da ansonsten die benötigte Kreuzungsgeometrie nicht bekannt ist.

Ein komplett anderer Ansatz wurde bei Dagli [DBB03] gewählt. Als wesentlicher Aspekt bei der Vorhersage möglicher Kollisionen gilt dabei eine *Plan-Erkennung* für alle beteiligten Verkehrsteilnehmer. Mit Hilfe einer Baumstruktur wird eine Fahrerverhaltens-Prädiktion für alle Fahrzeuge durchgeführt. Dabei wird jedem Ast des Baumes eine situationsabhängige Wahrscheinlichkeit zugewiesen. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Pfade, die eine Kollision zur Folge haben, entspricht der Kollisionswahrscheinlichkeit.

Die beiden letzt genannten Verfahren ([DBB03], [MI09]) sind sehr von der Güte der Fahrerverhaltens-Prädiktion abhängig. Nur wenn ein Fahrmanöver zu einem hohen Prozentsatz richtig erkannt wird, kann auch die Kollisionswahrscheinlichkeit entsprechend vernünftig abgeschätzt werden.

Für den zu implementierenden Warnalgorithmus steht nur eine begrenzte Anzahl von Parametern zur Verfügung. Daher muss ein recht einfacher Ansatz genutzt werden. Bei Brendt [BWD07] werden die kreuzenden Fahrzeuge einfach als Rechtecke dargestellt. Diese werden nun entsprechend der Fahrzeuggeschwindigkeiten aufeinander zu bewegt. Kommt es zu Überlappungen der Rechtecke, so kann dies als mögliche Kollision betrachtet werden. Die Abmessungen der Rechtecke werden dabei an die Fahrzeuggeometrie angelehnt. Die Länge des Rechtecks kann zusätzlich noch von der aktuellen Beschleunigung des Fahrzeugs abhängig gemacht werden.

Prädiktion und Unsicherheiten

Eine große Herausforderung bei der Trajektorienprädiktion stellt die Berücksichtigung der auftretenden Unsicherheiten dar. Alle verwendeten Parameter und Sensordaten sind mit Messfehlern behaftet. Vor allem die GPS-Genauigkeit hat oft einen sehr großen Einfluss auf die Güte der Vorhersage und hat damit natürlich auch eine direkte Auswirkung auf die TP- bzw. FP-Raten des auf den Vorhersagen beruhenden Warn-Algorithmus. Eine Möglichkeit dieser Unsicherheit entgegen zu wirken und damit die False-Positive-Rate zu senken, ist eine von der Positionsgenauigkeit abhängige TTC-Warnschwelle [EZS13].

Eine andere Möglichkeit ist die Modifikation der Größe bzw. der Form der jeweiligen Kollisionsbereiche. Je nach Architektur kann dies entweder durch ein Skalieren der

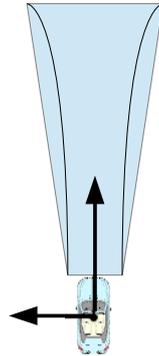


Abbildung 4.2: Fahrzeug mit aufgespanntem Fahrfächer.

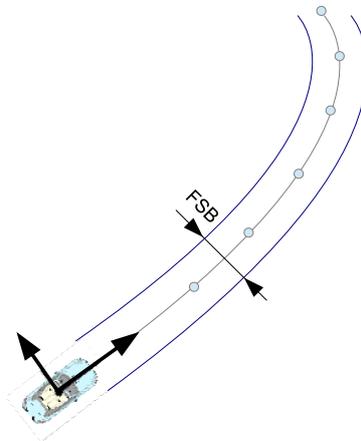


Abbildung 4.3: Fahrschlauchmodell: Trajektorie und der zugehörige Fahrschlauch mit der Breite FSB.

Fahrzeugrechtecke oder durch das Aufspannen eines Fahrfächers [Kla08] geschehen (siehe Abbildung 4.2).

Fahrschlauch-Prädiktion

Eine weitere Möglichkeit die Auswirkungen der Unsicherheiten auf den Warn-Algorithmus bzw. die zugehörige False-Positive-Rate zu senken, ist die Verwendung eines Fahrschlau-ches (siehe Abbildung 4.3). Dieser wird entlang der Trajektorie gezogen, wobei die Breite des Fahrschlau-ches entsprechend variiert werden kann. Die Fahrschlauchbreite kann somit also ein Steuerparameter für den Algorithmus verwendet werden [vR07]. Dieses Verfahren wird oft in Verbindung mit dem ACC-System¹ verwendet.

Höhenprofil aus den VZA-Daten

Als Nebenprodukt der VZA-Auswertung (siehe Kapitel 2) konnte zusätzlich eine Auswertung der Genauigkeit der GPS-Höheninformation durchgeführt werden. Dazu wurden

¹ACC ... Adaptive Cruise Control

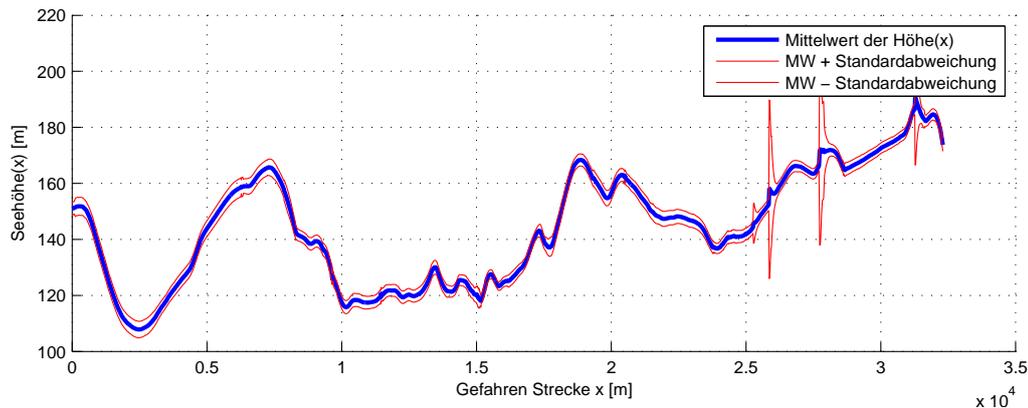


Abbildung 4.4: Auswertung der GPS-Höheninformation über eine ca. 30 km lange Strecke. Auswertung der GPS-Höheninformation über eine ca. 30 km lange Strecke.

die gefilterten Daten aus dem Abschnitt 2.5.7 verwendet. Dabei ist vor allem die relative Abweichung zwischen den Fahrzeugen von Interesse. Es wurden entlang der circa 30 km langen Strecke über 1800 Messpunkte definiert und die Höheninformation von insgesamt 120 Fahrten an den Messpunkten gesammelt. Diese Daten konnten im Anschluss analysiert und mittels Plot 4.4 veranschaulicht werden.

Der Median der Standardabweichung lag bei 2,3 m. Aus dem Plot geht hervor, dass die Streuung der Höheninformation entlang der Strecke bis auf drei Ausreißer recht konstant bleibt. Um zu entscheiden, ob sich zwei Fahrzeuge auf einer Ebene befinden bzw. treffen werden, oder ob sich ein Fahrzeug über dem anderen kreuzen wird (Brücke, Unterführung), ist die Genauigkeit der GPS-Höheninformation von hoher Bedeutung. Daher werden die Ergebnisse dieser Auswertung im dritten Kapitel noch intensiver betrachtet und ausgewertet.

2D- vs. 3D-Prädiktion und Genauigkeit der z-Achse

Bei einer Prädiktion ohne Kartenmaterial müsste für die Erkennung von Unterführungen bzw. Brücken über quer verlaufende Fahrbahnen auch die Höheninformation des GPS-Signales verwendet werden und aus der 2D-Trajektorie würde eine 3D-Trajektorie. Vor allem bei etwas älterer Literatur wird häufig darauf hingewiesen, dass die Höheninformation aus dem GPS-Signal für eine solche Erkennung unzureichend genau ist. Um festzustellen, ob die Höheninformation aus den Daten verlässlich genug wäre, um eine Trajektorienprädiktion auch in der z-Achse sinnvoll durchführen zu können, wurden sowohl Höhendaten aus dem simTD-Projekt (siehe Abschnitt 4.1.2) als auch aus einem BMW-Fahrversuch in den USA herangezogen (siehe Abbildung 4.5) und ausgewertet.

Bei Daten aus den USA lag der Median der Standardabweichung bei 0,42 m. Es muss an dieser Stelle aber erwähnt werden, dass für diese Auswertung nur Daten, die entlang einer mehrmals hintereinander befahrenen und ca. 300 m langen Strecke verwendet wurden. Die Messpunkte liegen also nah beisammen und störende Umwelteinflüsse wie Brücken oder Multipath-Effekte durch hohe Häuser können hier, im Gegensatz zu den simTD-Messdaten (Median der Standardabweichung bei 2,3 m; entlang einer 30 km langen Strecke) ausge-

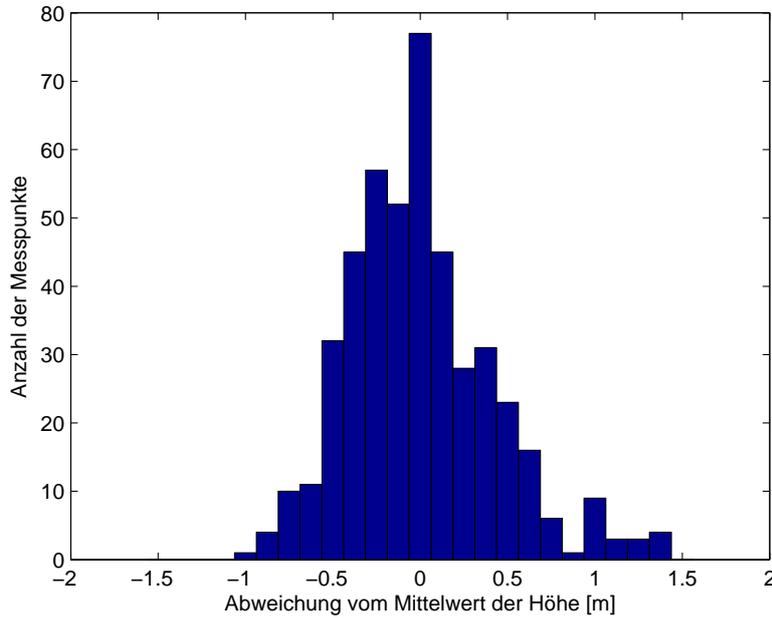


Abbildung 4.5: Auswertung der Genauigkeit der GPS-Höheninformation.

s [%]	12	11	10	9	8	7	6	5	4,5	4
v [km/h]	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130

Tabelle 4.1: Zusammenhang zwischen maximaler Längsneigung und Geschwindigkeit

geschlossen werden.

Zusätzlich wurden Informationen zur maximalen Längsneigung von Brücken bzw. Rampen und auch zur Höhe von Brücken im Orts- bzw. Stadtgebiet bei einem Münchner Straßenplaner und der ASFINAG eingeholt. In Tabelle 4.1 sind die maximalen Längsneigungen s in Abhängigkeit von der erlaubten Höchstgeschwindigkeit v angeführt².

Es wird aber grundsätzlich versucht, auch innerorts eine maximale Längsneigung von 4 bis 6 Grad einzuhalten, außer dies ist aus Platzmangel oder bautechnischer Notwendigkeit nicht möglich.

Um eine Aussage über die Möglichkeit einer 3D-Prädiktion treffen zu können, wurde aus den erhaltenen Informationen ein Brückenmodell mit den nachfolgenden Parametern angenommen:

- Höhenunterschied zwischen den kreuzenden Fahrbahnen: 5 m
- Anstiegsrampe mit 4 Grad Steigung (entspricht einer Höhenänderung von 4 cm / Meter Straße) und einer Länge von 125 Meter.
- Anstiegsrampe mit 6 Grad Steigung und einer Länge von 83 Meter.

²Quelle: ASFINAG

- Breite der Brücke von 8 Meter (2 Fahrspuren)

In der nachfolgenden Auswertung muss nun ermittelt werden, wann das System warnt und wie weit die Fahrzeuge dabei von der Brückenmitte (entspricht dem angenommenen Kollisionspunkt) entfernt sind. Damit kann zuerst der Höhenunterschied zwischen den beiden Fahrzeugen geschätzt und daraus eine Anforderung an die Genauigkeit der GPS-Höheninformation abgeleitet werden. Die Erkenntnisse aus der Auswertung können dem Abschnitt 4.3.8 entnommen werden.

4.1.3 Koordinatensysteme und Darstellung

Dieser Abschnitt beschreibt die zur Berechnung bzw. zur Veranschaulichung der Trajektorien verwendeten Koordinatensysteme. Zusätzlich werden die verwendeten Formeln und Transformationsmatrizen vorgestellt.

Darstellung und Berechnung in der x-y-Ebene

Um die Korrektheit des Warnalgorithmus nachvollziehen zu können, mussten die aktuellen Fahrzeugpositionen und die zugehörigen Trajektorien entsprechend grafisch aufbereitet werden. Die dafür benötigten Plots wurden mit Matlab in der X-Y-Ebene erzeugt. Abbildung 4.6 zeigt dazu ein Beispiel bestehend aus zwei Fahrzeugen. Das blaue Fahrzeug wird im Folgenden als Ego-Fahrzeug und das rote als Fremd-Fahrzeug bezeichnet. Der graue Pfeil gibt die Fahrtrichtung der jeweiligen Fahrzeuge an. In Abbildung 4.7 wird neben der aktuellen Fahrzeugposition auch die berechnete Prädiktion der Fahrtstrecke dargestellt.

In dieser Ebene wird also die räumliche und zeitliche Prädiktion für die betrachteten Fahrzeuge durchgeführt und daraus eine mögliche Kollision detektiert. In den nachfolgenden Abschnitten wird nun gezeigt, welche Schritte und Überlegungen notwendig sind, um die absoluten GPS-Positionsdaten in die X-Y-Ebene transformieren zu können.

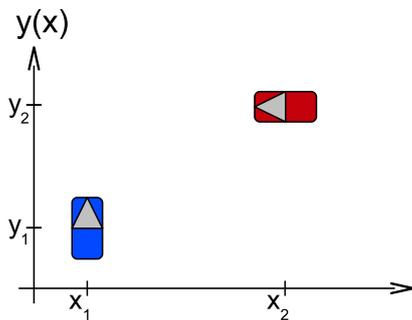


Abbildung 4.6: Darstellung von zwei Fahrzeugen in der X-Y-Ebene.

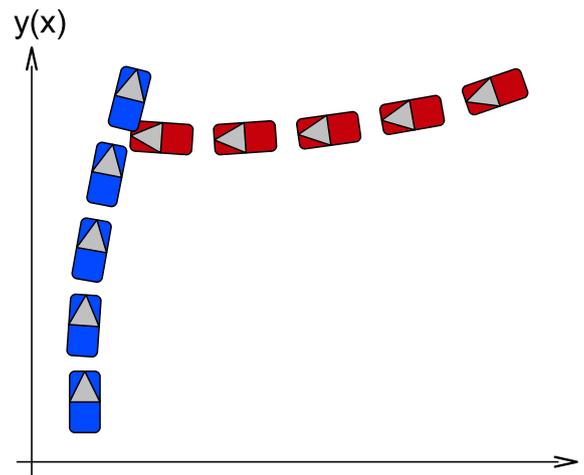


Abbildung 4.7: Fahrzeuge und die zugehörigen Trajektorien.

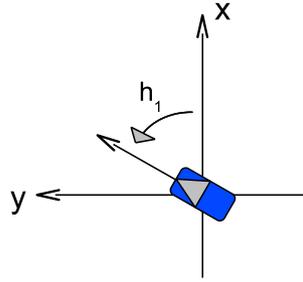


Abbildung 4.8: Fahrzeugkoordinatensystem und Heading.

Fahrzeug-Koordinatensystem

Im ersten Schritt müssen die GPS-Koordinaten mit Hilfe der in Abschnitt 1.6.1 beschriebenen geodätischen Abbildung in ein lokales, relatives Koordinatensystem überführt werden. Mit Hilfe der aktuellen Fahrtrichtung des betrachteten Fahrzeugs, im Folgenden als Heading bezeichnet, können die eben berechneten Koordinaten in das Fahrzeugkoordinatensystem übertragen werden. Das Heading wird als Winkel zur X-Achse im Intervall $[0...360^\circ]$ angegeben. Bei $Heading = 0^\circ$ fährt das Fahrzeug Richtung Norden. Siehe dazu Abbildung 4.8.

Durch eine Drehung des Fahrzeugkoordinatensystems um -90 Grad (nach rechts) können die Koordinaten in die im letzten Abschnitt beschriebene X-Y-Ebene überführt werden.

Verwendung der Gierrate

Die Gierrate $\dot{\Phi}$ eines Fahrzeugs, die zum Beispiel als Eingangsgröße für das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) dient, gibt an, ob ein Fahrzeug geradeaus fährt ($\dot{\Phi} = 0$) oder sich auf einer Kreisbahn bewegt. Der Sensorwert kann nun natürlich auch für eine genauere Trajektorienprädiktion herangezogen werden.

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die Gierrate in die Berechnung der Prädiktion miteinbezogen werden kann. Das Heading wird für die nachfolgenden Schritte nicht betrachtet bzw. als 0 angesehen.

Abbildung 4.9 zeigt die Positionsänderung eines Fahrzeugs bei einem Prädiktionsschritt der Länge Δt bei konstanter Geschwindigkeit v und einer konstanten Gierrate $\dot{\Phi} \neq 0$. Die Länge des Kreisbogens s (entspricht der in Δt zurückgelegten Fahrtstrecke) kann mittels $s = v * \Delta t$ berechnet werden.

Im nächsten Schritt wird der Kreisradius R (vorzeichenbehaftet!) ermittelt:

$$R = \frac{v}{\dot{\Phi}} \quad (4.1)$$

Als nächstes wird der Zentriwinkel des Kreissegments berechnet:

$$\varphi = \frac{s}{R} \quad (4.2)$$

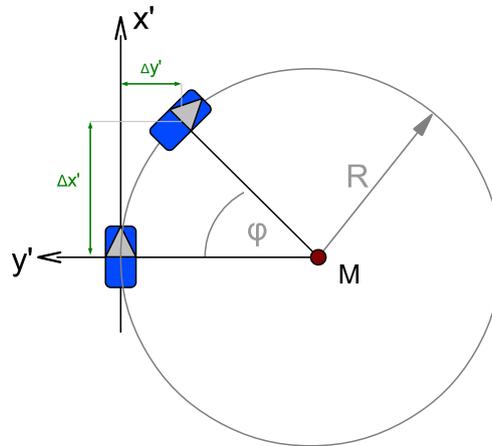


Abbildung 4.9: Gierrate: Berechnung des Längs- und Querversatzes.

Aus Radius und Zentriwinkel kann nun sowohl der Längsversatz $\Delta x'$ als auch der Querversatz $\Delta y'$ des Fahrzeugs ermittelt werden:

$$\Delta x' = R * \sin \varphi \quad (4.3)$$

$$\Delta y' = R - \frac{R}{|R|} \sqrt{R^2 - \Delta x'^2} \quad (4.4)$$

Zuletzt muss noch das Heading h des Fahrzeugs angeglichen werden:

$$h = h + \arctan\left(\frac{\Delta y'}{\Delta x'}\right) \quad (4.5)$$

Transformation in die x-y-Ebene

Die einzelnen Schritte und Erkenntnisse aus den letzten Abschnitten können nun in eine Transformationsmatrix eingearbeitet werden. Die verwendete Matrix kann der Gleichung 4.6 entnommen werden. Der Transformationswinkel $\varphi = h - 90^\circ$ setzt sich nun aus dem neuen Fahrzeugheading (siehe Gleichung 4.5) und den -90 Grad aus Abschnitt 4.1.3 zusammen.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

4.1.4 GIDAS-Daten

Das im Jahre 1999 gestartete GIDAS³-Projekt ist das größte Projekt zur Erhebung von Unfalldaten in Deutschland [Stu13]. Ziel des GIDAS-Projektes ist die umfassende Dokumentation von Verkehrsunfällen mit Personenschäden in zwei Erhebungsgebieten (Hannover und Dresden) in Deutschland. Dabei werden die Daten von verschiedensten Unfällen erfasst, eine Rekonstruktion des Unfallherganges durchgeführt und die daraus erhaltenen Unfallparameter (Unfallschwere, Unfalltyp, Aufprallrichtung, Fahrzeugtypen, ...) in einer Datenbank abgelegt.

Diese Daten können dann unter anderem dazu verwendet werden, häufige Unfallursachen zu identifizieren und aus den gewonnenen Erkenntnissen eine Strategie zur Vermeidung solcher Unfälle bzw. die Minderung der Unfallschwere zu erarbeiten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die GIDAS-Daten dazu verwendet, die Wahrscheinlichkeit einer prädizierten Kollision zu berechnen. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die Daten in GIDAS abgelegt werden und daraus die gewünschte Information gewonnen werden kann.

Unfälle im Kreuzungsbereich

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit sind natürlich nur Unfälle im Kreuzungsbereich zu betrachten. Diese Daten können über den GIDAS-Datenbankschlüssel `utyp`, ein dreistelliger Code, gewonnen werden. Die wichtigsten Kreuzungsunfälle liegen dabei zwischen Code 301 und 325. Die Häufigkeit der einzelnen Unfalltypen wurde ausgewertet und kann Abbildung 4.10 entnommen werden⁴.

Die Analyse der in Abbildung 4.10 präsentierten Daten zeigt, dass circa 91% aller Unfälle im Kreuzungsbereich den Unfalltypen 301, 302, 303, 321 oder 322 zugeordnet werden können. Eine Übersicht über diese häufig auftretenden Unfalltypen kann der Abbildung 4.11 entnommen werden. Der schwarze Pfeil stellt das Manöver des jeweils wartepflichtigen Fahrzeugs dar, der weiße Pfeil gibt die Fahrtrichtung des vorfahrtsberechtigten Kollisionspartners im Querverkehr wieder [MI09].

Auswertung des Kollisionswinkels

Im letzten Abschnitt wurden die häufigsten Unfalltypen identifiziert. Auf dieser Grundlage können nun die für die Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit benötigten Aufprallrichtungen der beteiligten Fahrzeuge bestimmt werden. Dazu wird in GIDAS das in Abbildung 4.12 dargestellte Modell entworfen. Bei einem typischen Auffahrunfall würde man zum Beispiel in der GIDAS-Datenbank einen Eintrag mit den Aufprallrichtungen 6 für das vordere bzw. 12 für das hintere Fahrzeug finden.

Mit Hilfe der GIDAS-Daten kann nun für jeden der fünf wichtigsten Unfalltypen ausgewertet werden, unter welchen Aufprallrichtungen die Fahrzeuge wie häufig kollidiert sind. In Abbildung 4.13 wurde diese Häufigkeitsverteilung für den Unfalltype 301 dargestellt. Die Verteilungen der anderen Unfalltypen können dem Anhang im Abschnitt C entnommen werden.

³German In-Depth Accident Study

⁴Dazu wurden 2986 Unfälle im Kreuzungsbereich herangezogen

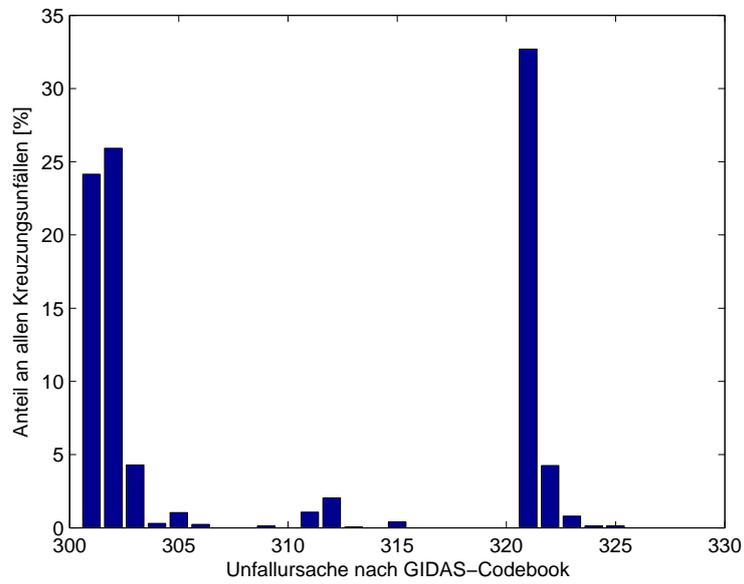


Abbildung 4.10: GIDAS-Datenbank: Kreuzungsunfalltypen und Häufigkeit

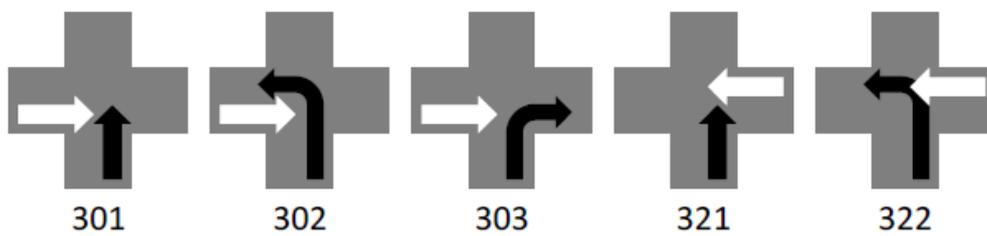


Abbildung 4.11: Übersicht über die häufigsten Unfalltypen im Kreuzungsbereich [MI09]

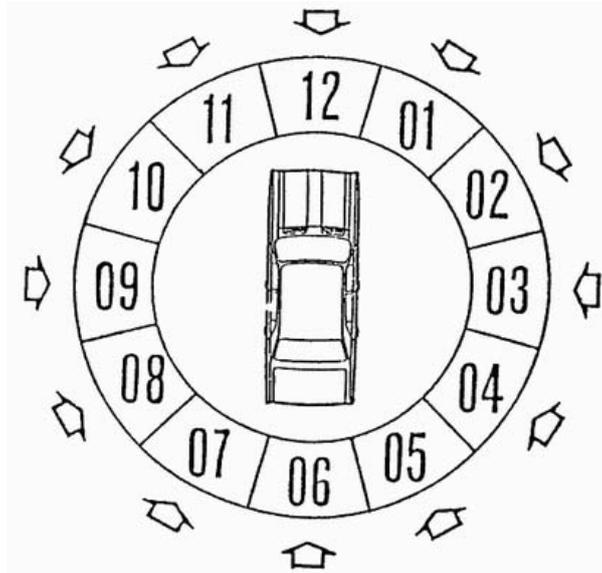


Abbildung 4.12: GIDAS-Codebook: Definition der Aufprallrichtung. [GIDAS11]

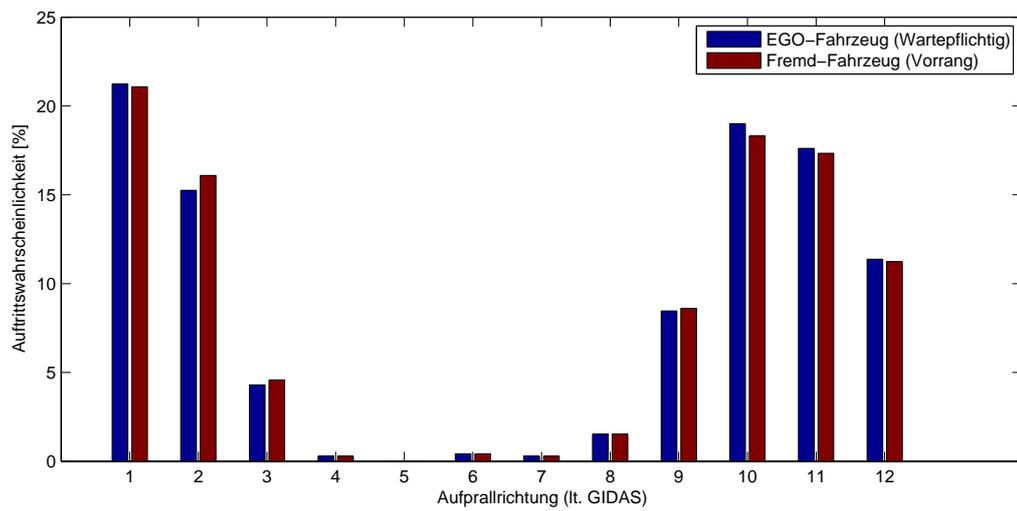


Abbildung 4.13: GIDAS-Datenbank: Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen.

Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit

Mit Hilfe der GIDAS-Daten soll eine Bewertung der über die Trajektorienprädiktion ermittelten kritischen Situationen (prädizierte Kollisionen) erfolgen. Dazu wird die vorherrschende Verkehrssituation einer der fünf Unfalltypen zugeordnet, danach wird die prädizierte Aufprallrichtung für beide Fahrzeuge bestimmt und zuletzt wird die Wahrscheinlichkeit für die prädizierte Kollision auf Basis der GIDAS-Daten bestimmt. Liegt diese Wahrscheinlichkeit über einem vordefinierten Schranke, wird die Situation als kritisch eingestuft und es kann eine Warnung generiert werden.

Die nachfolgende Auflistung zeigt nochmals die nötigen Schritte zur Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit:

1. **Verkehrssituation einem Unfalltyp zuordnen:** Aufgrund der Positionsdaten und des Headings der Fahrzeuge wird versucht, die aktuell vorliegende Situation einem der fünf Unfalltypen zuzuordnen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Ego-Fahrzeug dem Fremdfahrzeug Vorrang gewähren muss. Kann die Situation nicht zugeordnet werden, kann auf Basis der GIDAS-Daten keine Bewertung der Prädiktion durchgeführt werden.
2. **Prädizierte Aufprallrichtung ermitteln:** Wenn eine Kollision detektiert wurde, liegen auch die Winkelbeziehungen zwischen den Fahrzeugen vor. Daraus kann schließlich die Aufprallrichtung für beide Fahrzeuge abgeleitet werden.
3. **Aufprallwahrscheinlichkeit für beide Fahrzeuge bestimmen:** Im letzten Schritt wurde die Aufprallrichtung für beide Fahrzeuge bestimmt. Diese kann nun in die Häufigkeitsverteilung (siehe dazu Abbildung 4.13) eingesetzt und daraus die Aufprallwahrscheinlichkeit für das jeweilige Fahrzeug und für den gewählten Unfalltyp bestimmt werden.
4. **Berechnung der Kollisionswahrscheinlichkeit:** Zuletzt werden diese beiden Aufprallwahrscheinlichkeiten noch miteinander multipliziert, um die Kollisionswahrscheinlichkeit zu erhalten.

Die berechnete Kollisionswahrscheinlichkeit gibt in diesem Fall also an, wie wahrscheinlich die prädizierte Kollision laut GIDAS-Datenbank auftritt und ist somit ein Maß für die Güte der Prädiktion.

4.2 Der Warnalgorithmus

In diesem Abschnitt wird der implementierte Warnalgorithmus im Detail beschrieben und die einzelnen Schritte der durchgeführten Trajektorienprädiktion erörtert. Zusätzlich wird auf die Parameter des Algorithmus und auf die angewendeten Bewertungskriterien eingegangen.

4.2.1 Blockdiagramm des Warnalgorithmus

Abbildung 4.14 zeigt die Architektur des Warnalgorithmus anhand eines Blockdiagramms. In diesem Abschnitt wird das Zusammenspiel und die In- bzw. Outputs der einzelnen Funktionsblöcke beschrieben.

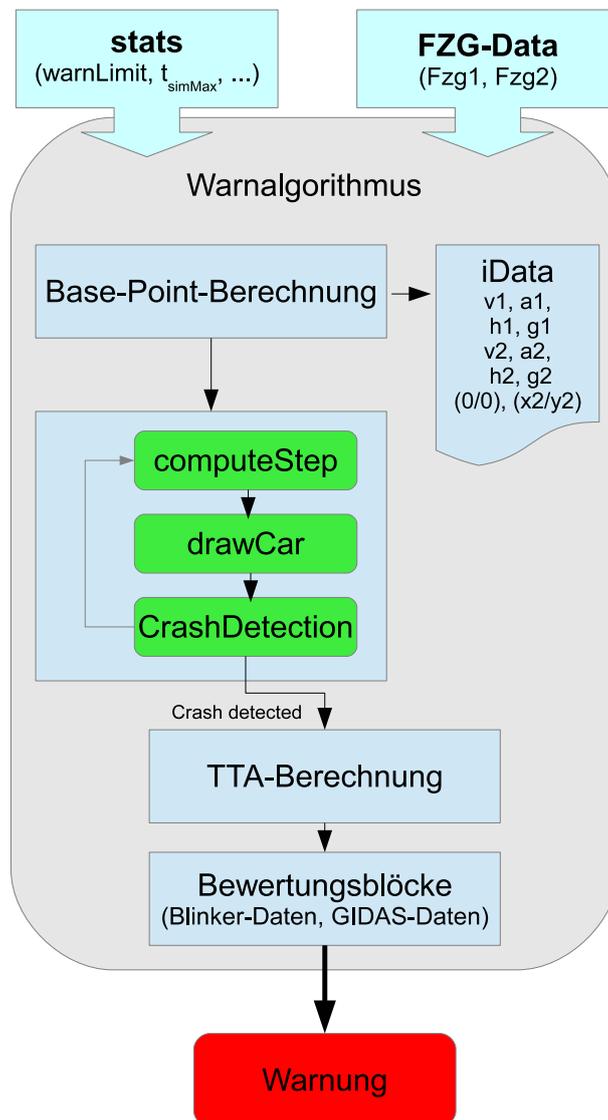


Abbildung 4.14: Blockdiagramm des implementierten Warnalgorithmus

Im Zuge der Implementierungsarbeit wurde der Algorithmus immer wieder mit den simTD-Querverkehrsdaten getestet und die daraus gewonnenen FP- bzw. TP-Raten als Maß herangezogen, um die Wirksamkeit einzelner Bewertungskriterien und Parametervariationen evaluieren zu können.

Zur Variation der Parameter wurde die Datenstruktur *stats*, die die wichtigsten Steuerparameter des Algorithmus beinhaltet, definiert. Eine Instanz dieses Datenobjektes kann dem Algorithmus übergeben werden. Somit ist es möglich, neben den Simulationsergebnissen auch immer den aktuell verwendeten Parametersatz abzulegen, um im Nachhinein die Simulationsergebnisse besser aus- bzw. bewerten zu können. Neben dem Parametersatz benötigt der Algorithmus natürlich auch Informationen über die Fahrzeuge. Auch für diese Daten, im Blockdiagramm als *FZG-Data* bezeichnet, wurde eine entsprechende Struktur definiert, die dem Algorithmus am Beginn übergeben werden muss. Die Fahrzeugdaten beinhalten die wichtigsten Fahrzeugparameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung, etc.) und die zugehörigen Positionsdaten (Heading, GPS-Koordinaten).

Im ersten Schritt werden die GPS-Positionsdaten des Ego-Fahrzeugs als Bezugspunkt für die weiteren Berechnungsschritte herangezogen und die relative Position des Fremdfahrzeugs mittels geodätischer Abbildung (siehe dazu 1.6.1) bestimmt. Damit können die nachfolgenden Berechnungen in der X-Y-Ebene bzw. mit lokalen Positionsdaten durchgeführt werden. Des Weiteren werden die initialen Fahrzeugparameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Heading, Gierrate) gesammelt, zusammen mit den lokalen Positionsdaten in der Datenstruktur *iData* abgelegt und als Ausgangspunkt für die Trajektorienprädiktion herangezogen.

Nun kann die eigentliche Prädiktion der Fahrzeugtrajektorien erfolgen. Dieser Schritt wird im Abschnitt 4.2.2 ausführlich beschrieben. Wird dabei eine Kollision detektiert, wird im nächsten Schritt die TTA berechnet. Liegt diese unter dem in *stats* abgelegten Warnlimit und wird die prädiizierte Kollision von den nachgeschalteten Bewertungsblöcken als wahrscheinlich eingestuft, wird eine Warnung generiert.

4.2.2 Die Trajektorienprädiktion

Die Prädiktion der Fahrzeugtrajektorien ist das Herzstück des Warnalgorithmus. Die Fahrzeuge werden als Rechtecke abstrahiert und schrittweise aufeinander zu bewegt. Kommt es zu einer Überlappung der Fahrzeuge, stoppt die Prädiktion und liefert dem Algorithmus die Positions- und Zeitdaten der detektierten Kollision.

Im Abschnitt 4.1.2 wurden bereits einige Möglichkeiten und Informationen zur Trajektorienprädiktion diskutiert. In diesem Abschnitt wird nun die implementierte Variante im Detail vorgestellt und beschrieben.

Übersicht und Ablauf

Die Prädiktion erfolgt schrittweise bis entweder die maximale Simulationszeit überschritten, oder eine Kollision prädiiziert wird. In Abbildung 4.15 wird der Ablauf der Prädiktion dargestellt.

Als erstes wird eine Schrittweite t_{Step} (siehe Gleichung 4.7) berechnet. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Schrittweite so gewählt wird, dass die Fahrzeuge für jeden

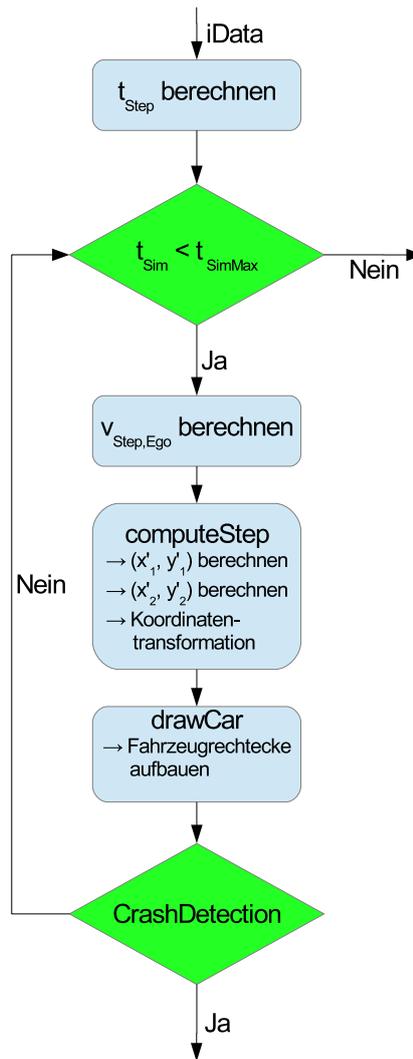


Abbildung 4.15: Ablaufdiagramm der Trajektorienprädiktion

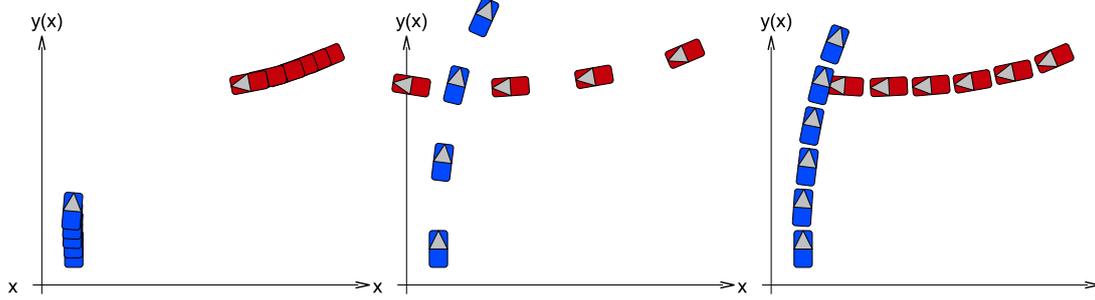


Abbildung 4.16: Variation der Schrittweite: Links zu klein, in der Mitte zu groß und rechts richtig gewählt.

Iterationsschritt um circa eine Fahrzeuglänge weiter verschoben werden. Wird die Schrittweite zu klein gewählt, leidet die Performanz der Funktion, da sehr viele unnötige Iterationsschritte gerechnet werden müssen. Bei zu großer Schrittweite kann es im schlimmsten Fall dazu kommen, dass eine Kollision nicht erkannt wird, da sich die Fahrzeuge kreuzen, ohne dass es zu einer Überlappung der Fahrzeugrechtecke kommt. Siehe dazu auch Abbildung 4.16.

$$t_{step} = \frac{\min(l_1, l_2)}{\max(v_1, v_2)} \quad (4.7)$$

mit $l \dots$ Fahrzeuglänge
mit $v \dots$ Fahrzeuggeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit des Fremdfahrzeugs wird über alle Iterationsschritte konstant auf $v_{Fremd}(t) = v_{Fremd}(0)$ gehalten. Für das Ego-Fahrzeug kann ein vordefiniertes Geschwindigkeitsmodell (siehe Gleichung 4.9 bzw. 4.10), das über einen Parameter in *stats* entsprechend angepasst wird, verwendet werden. Der Parameter $t_{a,duration}$ gibt an, wie lange die aktuelle Fahrzeugbeschleunigung im Geschwindigkeitsmodell berücksichtigt wird.

$$t_{Sim} \leq t_{a,duration} : v_1(t) = v_1(0) + a_1 * t_{Sim} \quad (4.8)$$

$$t_{Sim} > t_{a,duration} : v_1(t) = v_1(0) + a_1 * t_{a,duration} \quad (4.9)$$

$$v_1(t_{Sim}) < 0 : v_1(t_{Sim}) = 0 \quad (4.10)$$

Somit muss die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs $v_1(t)$ ebenfalls für jeden Iterationsschritt über die obigen Gleichungen berechnet werden.

Nun kann der eigentliche Prädiktionsschritt, mittels der Funktion *computeStep*, berechnet werden. Das Ergebnis der Berechnung wird der Funktion *DrawCar* übergeben, die auf Basis der neuen Daten die Fahrzeuge „weiterbewegt“ und dabei eine mögliche Änderung des Headings mitberücksichtigt. Die Funktion befüllt eine Instanz der Datenstruktur *cars* mit den vier Eckpunkten der Fahrzeugrechtecke der beiden Fahrzeuge und übergibt diesen Datensatz an die Funktion *CrashDetection*.

Hier wird überprüft, ob es zu einer Überlappung der Rechtecke und damit zu einer Kollision der beiden prädizierten Fahrzeuge gekommen ist. Ist dies der Fall, wird der letzte

Iterationsschritt mit einer feineren Schrittweite wiederholt. Damit lässt sich die TTC bzw. die TTA und die Aufprallrichtung noch genauer bestimmen.

Funktion `computeStep`

In dieser Funktion wird jeweils ein Iterationsschritt für beide Fahrzeuge gerechnet. Dazu müssen der Funktion folgende Parameter übergeben werden:

1. t_{Step} ... Die Schrittweite der Simulation.
2. v_1 bzw. v_2 ... Die Fahrzeuggeschwindigkeiten
3. g_1 bzw. g_2 ... Die Gierrate der Fahrzeuge
4. h_1 bzw. h_2 ... Das Heading der Fahrzeuge

Über die Gierrate der Fahrzeuge kann nach den in Abschnitt 4.1.3 bereits beschriebenen Formeln zuerst der Winkel $\Delta\varphi$ und daraus der x- bzw. y-Versatz für beide Fahrzeuge berechnet werden (siehe dazu Formel 4.1 bis 4.4).

Als nächstes kann das Heading der Fahrzeuge nach der Formel 4.5 berechnet werden. Zuletzt wird die Koordinatentransformationsmatrix 4.6 angewendet, um die neu berechneten Werte in das für die `drawCar`-Funktion benötigte Koordinatensystem zu bringen.

Es wurde festgelegt, dass die Gierrate maximal bis zu einer Drehung des Fahrzeugs um 90 Grad⁵ um die Fahrzeugachse verwendet wird. Danach wird die Gierrate nicht mehr berücksichtigt, das Heading des Fahrzeugs bleibt ab diesem Punkt konstant und das Fahrzeug bewegt sich für die nachfolgenden Iterationsschritte geradeaus.

Funktion `drawCar`

Diese Funktion muss für jedes Fahrzeug extra aufgerufen werden und benötigt die Länge l und die Breite w des Fahrzeugs sowie das Heading h und den prädierten Standort (x,y) des Fahrzeugmittelpunktes (in der lokalen x-y-Ebene) als Übergabeparameter.

Zuerst wird das Fahrzeugrechteck mit $Heading = 0$ aufgebaut. Das tatsächliche Fahrzeugheading wird im Anschluss durch die Multiplikation der Punkte mit der Inversen⁶ der Drehmatrix 4.11 berücksichtigt.

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} \cos h & -\sin h \\ \sin h & \cos h \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

In dieser Funktion werden auch die Parameter Fahrschlauchbreite FSB (siehe dazu 4.1.2) und die Safeparams berücksichtigt. Der Wert für den Parameter FSB wurde, ähnlich wie bei dem Wert für Δh_{Max} , durch Variation und Validierung der TP-Rate auf Basis der simTD-Daten bestimmt.

⁵Dieser Wert wurde dazu im Bereich $60 \text{ Grad} \leq \Delta h_{Max} \leq 120 \text{ Grad}$ variiert und auf Basis der simTD-Daten validiert. 90 Grad wurde dabei als Optimum (im Bezug auf die TP-Rate) gewählt.

⁶Hierbei wird das (Fahrzeug-) Koordinatensystem gedreht. Deshalb muss mit der Inversen der Drehmatrix multipliziert werden.

Die Fahrstreifenbreite wird in diesem Fall dazu verwendet, die Breite des Rechtecks und damit die Breite des abstrahierten Fahrzeugs zu verringern und geht als multiplikative Konstante in die Berechnung der Eckpunkte ein. Die FSB wurde im Bereich $0,3 \leq FSB \leq 1$ variiert.

Die SafeParams werden verwendet, um die zeitliche Unsicherheit der Trajektorienprädiktion mitzuberechnen. Die Parameter können für die Fahrzeugfront (*safeParamFront*) und das Fahrzeugheck (*safeParamBack*) einzeln gewählt bzw. variiert werden und wirken sich auf die Fahrzeuglänge (additive Konstanten) aus. Die SafeParams sind zeitliche Konstanten und müssen daher noch mit der Fahrzeuggeschwindigkeit multipliziert werden, um auf ein Längenmaß zu kommen:

$$frontParamLen_{1,2} = safeParamFront_{1,2} * v_{1,2} \quad (4.12)$$

$$backParamLen_{1,2} = safeParamBack_{1,2} * v_{1,2} \quad (4.13)$$

Daraus ergeben sich folgende Gleichungen für die Eckpunkte:

$$P'_1 = \begin{bmatrix} -w/2 * FSB \\ l/2 + frontParamLen \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$P'_2 = \begin{bmatrix} w/2 * FSB \\ l/2 + frontParamLen \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$P'_3 = \begin{bmatrix} w/2 * FSB \\ -l/2 + backParamLen \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$P'_4 = \begin{bmatrix} -w/2 * FSB \\ -l/2 + backParamLen \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Diese Punkte können nun mit der Inversen der Drehmatrix 4.11 multipliziert werden:

$$P''_i = R_\alpha^{-1} * P'_i \text{ mit } 1 \leq i \leq 4 \quad (4.18)$$

Um nun die endgültigen Eckpunkte zu erhalten, muss noch die Position der Fahrzeuge (x,y) berücksichtigt werden:

$$P_i = \begin{bmatrix} P''_{i,x} + x \\ P''_{i,y} + y \end{bmatrix} \text{ mit } 1 \leq i \leq 4 \quad (4.19)$$

Die berechneten Punkte werden schließlich in der Datenstruktur *cars* abgelegt und der Funktion *CrashDetection* übergeben. Zur Vollständigkeit werden in Tabelle 4.2 noch die Werte für die verwendeten Parameter angeführt. Die SafeParams wurden, um den Vergleich zu simTD so exakt wie möglich durchführen zu können, mit 0,6 s Sekunden gewählt (derselbe Wert wie bei simTD). Durch die Variation dieser Parameter könnte noch eine Optimierung der Funktion erfolgen.

FSB	0,8
$safeParamFront_{Ego}$	0,6 s
$safeParamBack_{Ego}$	0,6 s
$safeParamFront_{Fremd}$	0,6 s
$safeParamBack_{Fremd}$	0,6 s

Tabelle 4.2: Gewählte Werte für benötigte Parameter

Funktion CrashDetection

In dieser Funktion wird überprüft, ob sich die Fahrzeugrechtecke überschneiden. Dazu wurde ein einfacher Punkt-In-Polygon-Algorithmus implementiert (siehe dazu [Hai13]). Mit diesem Algorithmus kann nun überprüft werden, ob einer der Eckpunkte eines Fahrzeugs im Fahrzeugrechteck des anderen Fahrzeugs liegt.

Wird eine Überschneidung der Rechtecke erkannt, wird dies an den Algorithmus zurückgeliefert und die Simulation wird beendet.

4.2.3 Implementierte Bewertungsstufen

In diesem Abschnitt werden zwei Methoden, um mögliche Fehlprädiktionen zu erkennen, vorgestellt. Dazu werden zusätzliche Informationen (Blinkerdaten, GIDAS-Datenbank) verwendet und mit den Daten der Prädiktion verknüpft.

Die Bewertungsmethoden sind sehr einfach aufgebaut und könnten auch im Fahrzeug mit relativ wenig CPU-Aufwand betrieben werden. Die nachfolgende Auswertung wird zeigen, dass schon mit diesen recht einfachen Methoden einige FP vermieden werden können.

Bewertung der Kollision mittels Blinkerdaten

Es werden die Blinkerdaten des Ego- und des Fremdfahrzeugs genutzt, um berechnete Kollisionen zu bewerten und mögliche Fehlprädiktionen zu erkennen.

Bewertung auf Basis der Ego-Daten:

Zunächst werden nur die Blinkerdaten des Ego-Fahrzeugs und das prädizierte Heading der beiden Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Kollision für die Bewertung herangezogen. Es müssen hierzu also keine Blinkerdaten des Fremdfahrzeugs empfangen werden.

Anhand der Blinkerdaten wird nun zwischen

- Geradeaus fahren, wenn kein Blinker gesetzt wurde
- Links abbiegen, wenn der linke Blinker gesetzt wurde
- Rechts abbiegen, wenn der rechte Blinker gesetzt wurde

unterschieden. Für die drei Fälle werden nun die Winkelbeziehungen zwischen den Fahrzeugsheadings als Bewertungsgrundlage herangezogen:

1. Ego fährt geradeaus: Liegt das Heading des Fremdfahrzeugs zwischen $h_{Ego} + 170^\circ \leq h_{Fremd} \leq h_{Ego} + 190^\circ$, wird die prädizierte Kollision als falsch bewertet.

2. Ego biegt rechts ab: Eine prädizierte Kollision wird als gültig angesehen, wenn das Heading des Fremdfahrzeugs im Bereich $h_{Ego} - 30^\circ \leq h_{Fremd} \leq h_{Ego} + 135^\circ$ liegt.
3. Ego biegt links ab: Liegt das Heading des Fremdfahrzeugs im Bereich $h_{Ego} + 165^\circ \leq h_{Fremd} \leq h_{Ego} + 175^\circ$, wird die prädizierte Kollision als falsch bewertet. Bei diesem Manöver ist also beinahe jeder Kollisionswinkel denkbar.

Bewertung mit Hilfe der Blinkerdaten beider Fahrzeuge:

Auch hier muss eine Fallunterscheidung getroffen werden, um die Bewertung durchführen zu können.

1. Fremd fährt geradeaus: Es wird von dieser Funktion keine Bewertung durchgeführt.
2. Fremd biegt rechts ab:
 - (a) Ego fährt geradeaus: Liegt das Heading des Fremdfahrzeugs zwischen $h_{Ego} + 10^\circ \leq h_{Fremd} \leq h_{Ego} + 270^\circ$, ist ein Crash sehr unwahrscheinlich und die prädizierte Kollision wird als falsch bewertet.
 - (b) Ego biegt rechts ab: Eine Kollision von zwei rechts abbiegenden Fahrzeugen ist sehr unwahrscheinlich und wird daher als falsch bewertet.
 - (c) Ego biegt links ab: Eine prädizierte Kollision wird als gültig angesehen, wenn das Heading des Fremdfahrzeugs im Bereich $h_{Ego} + 150^\circ \leq h_{Fremd} \leq h_{Ego} + 270^\circ$ liegt.
3. Wenn beide Fahrzeuge nach links blinken und gerade aufeinander zufahren (das Heading des Fremdfahrzeugs liegt im Bereich $h_{Ego} + 170^\circ \leq h_{Fremd} \leq h_{Ego} + 190^\circ$), wird der vorhergesagte Crash nicht als gültig angenommen.

Die verwendeten Bereiche wurden rein aus grafischen Überlegungen erarbeitet und das Ergebnis der Bewertung könnte natürlich durch schärfere Schranken und zusätzliche Abfragen weiter verbessert werden. Dieser Abschnitt soll jedoch zeigen, wie mit einfachsten Beobachtungen bereits einige FPs beseitigt werden können.

Bewertung der Kollision mittels GIDAS-Daten

Grundlegende Informationen zur Verwendung der GIDAS-Datenbank sowie der Ablauf zur Bewertung einer prädizierten Kollision aus den extrahierten Daten, wurde bereits in Abschnitt 4.1.4 beschrieben. Dabei wurden fünf verschiedene Unfalltypen (Utyp 301, 302, 303, 321 und 322) betrachtet. Zur Bewertung der prädizierten Kollision muss also noch der für die vorherrschende Funktion passendste Unfalltyp bestimmt werden. Auch hier werden die Blinkerdaten des Ego-Fahrzeugs und das Heading der beiden Fahrzeuge verwendet, um diese Klassifikation treffen zu können (siehe dazu auch Abbildung 4.11). Kann eine Situation nicht eindeutig einem Unfalltyp zugeordnet werden, wird die Kollisionswahrscheinlichkeit von allen möglichen Unfalltypen berechnet. Zur Bewertung der Kollision wird danach die größte ermittelte Kollisionswahrscheinlichkeit herangezogen.

Die berechnete Kollisionswahrscheinlichkeit kann nun als Kollisionsindikator verwendet und mit einer vordefinierten Schranke verglichen werden. Liegt der Kollisionsindikator

über dieser Schranke, wird die prädizierte Kollision als sehr wahrscheinlich und damit als gültig angesehen.

4.3 Validierung des Warnalgorithmus auf Basis von simTD-Daten

Die wichtigsten Implementierungsschritte und Designentscheidungen wurden in den vorangegangenen Abschnitten diskutiert und erläutert. Der daraus erarbeitete Algorithmus und die Auswirkungen der Variation von wichtigen Parametern wurden schließlich auf Basis der simTD-QVA-Daten validiert. Die daraus erhaltenen Ergebnisse und Erkenntnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten präsentiert.

4.3.1 Die verwendeten Testdaten

Zur Validierung des Warnalgorithmus wurden Daten aus dem simTD-Feldversuch verwendet. Insgesamt wurden hier ca. 2000 Kreuzungssituationen zur Evaluierung herangezogen. Der simTD-Querverkehrsassistent ist ein Prototyp, der im Zuge des simTD-Projektes das erste Mal im Feld getestet wurde. Die vom System generierten Warnungen direkt als Referenz zu verwenden ist also nicht möglich bzw. sinnvoll. Es werden nur jene Warnungen als TPs gewertet, die von den Testfahren explizit als gerechtfertigt gekennzeichnet wurden⁷. Natürlich handelt es sich dabei ebenfalls nur um die subjektive Einschätzung der jeweiligen Testperson. Doch im Moment stellen diese bewerteten Warnungen wohl die beste verfügbare Referenz in diesem Bereich dar.

Die grundsätzliche Aufbereitung der Daten wurde bereits in den beiden vorangegangenen Kapiteln hinreichend erklärt und wird hier nicht mehr genauer diskutiert. Die für den zu testenden Algorithmus benötigten Sensordaten und Fahrzeugparameter können alle direkt den Logdaten entnommen werden.

Jedoch mussten zwei Einschränkungen in Kauf genommen werden:

1. Dem implementierten Algorithmus stehen keinerlei Informationen über die vorherrschende Verkehrsregelung und Spurführung zur Verfügung. Aus diesem Grund kann vom System nicht unterschieden werden, ob das betrachtete Ego-Fahrzeug im Kreuzungsbereich Vorrang oder Wartepflicht gegenüber einem anderem Verkehrsteilnehmer hat. Sind also beide Fahrzeuge mit dem entsprechenden C2C-Kommunikationssystem ausgerüstet, würde in vielen Fällen in beiden Fahrzeugen eine Warnung generiert und angezeigt. Für die nachfolgende Auswertung wird der Warnalgorithmus nur auf das Ego-Fahrzeug angewendet und damit werden auch nur für dieses Fahrzeug Warnungen generiert und in die Auswertung aufgenommen.
2. Der Sensorwert für die Gierrate des Fremd-Fahrzeugs stand aufgrund eines Fehlers beim Loggen der Daten zur Auswertung nicht zur Verfügung. Dieser Umstand verfälscht natürlich das Ergebnis der Berechnung. Da sich das Fremd-Fahrzeug aber bei allen ausgewerteten Situationen auf der zweispurigen Geraden bewegt, liegt der Fehler bei der Trajektorienprädiktion aber in einem hinnehmbaren Bereich.

⁷Direkt nach jeder im Fahrzeug angezeigten Warnung konnte die Notwendigkeit dieser Warnung über einen Touchscreen bewertet werden

	RAW	EGO-Data	Fremd-Data	GIDAS(TH=4)	GIDAS(TH=50)	ALL
#Testcases	1956	1956	1956	1956	1956	1956
davon TPs	27	27	25 (-2)	27	25 (-2)	23 (-4)
davon FPs	436	425 (-11)	368 (-68)	434 (-2)	385 (-51)	306 (-130)
davon FNs	0	0	2	0	2	4
davon TNs	1493	1504	1561	1495	1544	1623

Tabelle 4.3: Übersicht über die erhaltenen TPs und FPs (TTA = 0.8 s).

	ohne a	a für 1 s	a für 2 s	a für 3 s
#Testcases	1956	1956	1956	1956
davon TPs	23	26 (+3)	26 (+3)	24 (+1)
davon FPs	306	280 (-26)	295 (-11)	292 (-14)
davon FNs	4	1 (-3)	1 (-3)	3 (-1)
davon TNs	1623	1649	1634	1495

Tabelle 4.4: Übersicht über die erhaltenen TPs und FPs bei Einbeziehung der aktuellen Beschleunigung.

4.3.2 Auswirkung der einzelnen Filterstufen

Tabelle 4.3 zeigt eine Übersicht über die ausgewerteten Testfälle und die dabei erhaltenen *True Positives* (TPs, Warnung in simTD und ebenso beim implementierten Algorithmus), *False Positives* (FPs, keine Warnung des simTD-Systems, jedoch eine Warnung des Algorithmus), *False Negatives* (FNs, Warnung der simTD-QVA, aber keine Warnung des Algorithmus) und *True Negatives* (TNs, beide Systeme generierten keine Warnung).

Die Wirksamkeit der in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Bewertungskriterien kann ebenfalls der Tabelle entnommen werden. Man erkennt, dass durch die Verwendung aller Bewertungsstufen (mit einem Threshold TH von 50 bei den GIDAS-Daten) zwar vier TPs verloren gehen (ca. -15%) aber damit auch 130 FPs vermieden werden können (ca. -30%). Für die weiteren Auswertungsschritte wurden aus diesem Grund alle Bewertungsstufen verwendet, um möglichst viele False Positives zu beseitigen.

4.3.3 Auswirkung von verschiedenen Ego-Geschwindigkeitsmodellen

In Abschnitt 4.2.2 wurde bereits beschrieben, dass bei der Implementierung des Algorithmus ein einfaches Geschwindigkeitsmodell für das Ego-Fahrzeug verwendet wird. Mit Hilfe des Modells kann die aktuelle Beschleunigung für einen gewissen Zeitraum $t_{a,duration}$ mitberücksichtigt werden.

Tabelle 4.4 zeigt die erhaltenen Ergebnisse für verschiedene Werte von $t_{a,duration}$. Mit Hilfe des Geschwindigkeitsmodells können nicht nur weitere False Positives (für $t_{a,duration} = 1s$: -8%) beseitigt sondern, auch bis zu drei True Positives (+ 13%) wieder detektiert werden.

	TTA=0,8 s	TTA=0,2 s	TTA=0 s	TTA=-0,5 s	TTA=-1 s	TTA=-1,5 s
#Testcases	1956	1956	1956	1956	1956	1956
davon TPs	26	23 (-3)	22 (-4)	20 (-6)	17 (-9)	4 (-22)
davon FPs	280	253 (-33)	247 (-33)	237 (-43)	174 (-106)	50 (-230)
davon FNs	1	4 (+3)	5 (+4)	7 (+6)	10 (+9)	23 (+22)
davon TNs	1649	1676	1682	1692	1682	1879

Tabelle 4.5: Übersicht über die erhaltenen TPs und FPs bei Variation der TTA.

	TTA=0,8 s	TTA=0,8 s	TTA=0 s	TTA=-1 s
EGO vorne	0,6 s	0 s	0 s	0 s
EGO hinten	0,6 s	0 s	0 s	0 s
Fremd vorne	0,6 s	0,6 s	0,6 s	0,6 s
Fremd hinten	0,6 s	0,2 s	0,2 s	0,2 s
#Testcases	1956	1956	1956	1956
davon TPs	26	20 (-6)	17 (-9)	12 (-14)
davon FPs	280	223 (-57)	204 (-76)	129 (-151)
davon FNs	1	7 (+6)	10 (+9)	15 (+14)
davon TNs	1649	1706	1725	1800

Tabelle 4.6: Variation der Safeparams

4.3.4 Verschiebung der Warnschwelle durch Variation der TTA

Bisher wurde für die TTA eine Warnschwelle von 0,8 Sekunden für die Auswertung verwendet. Wird also für eine prädiizierte Kollision ein TTA von unter 0,8 Sekunden ermittelt, wird vom Algorithmus eine Warnung generiert. Wird diese Schwelle weiter nach unten verschoben (es wird also tendenziell später gewarnt), können möglicherweise weitere False Positives beseitigt werden.

Tabelle 4.5 zeigt das Ergebnis der Auswertung für verschiedene TTA-Werte. Ein negativer Wert für die TTA bedeutet hier, dass eine Kollision laut der berechneten TTA nicht mehr vermieden werden kann. Durch ein Herabsetzen der TTA können zwar sehr viele FPs vermieden werden, doch es gehen auch verhältnismäßig viele TPs verloren.

4.3.5 Variation der Safeparams

Eine weitere Variationsmöglichkeit ist durch die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Safeparams gegeben. Mit Hilfe dieser Parameter kann die zeitliche Unsicherheit der Prädiktion berücksichtigt werden.

Tabelle 4.6 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Parametersätze in Verbindung mit den unterschiedlichen TTAs. Auch durch eine geeignete Wahl der Safeparams können weitere False Positives (TTA=0,8 Sekunden: -20%) beseitigt werden. Leider gehen auch hier zusätzlich relativ viele True Positives (TTA=0,8 Sekunden: -23%) verloren.

	RAW	ALL	$t_{a,dur} = 1\text{ s}$ und $\text{TTA}=0,8\text{ s}$	$\text{TTA}=0\text{ s}$	$\text{TTA}=-1\text{ s}$
Mittelwert($t_{simTD} - t_{US}$)	-265 ms	-264 ms	-2 ms	-712 ms	-1534 ms
Std ⁸ ($t_{simTD} - t_{USwarn}$)	1,506 s	1,289 s	0,962 s	1,1 s	1,1 s

Tabelle 4.7: Differenz der Warnzeitpunkte zwischen dem simTD- und dem US-System.

	RAW	ALL	$t_{a,dur} = 1\text{ s}$ und $\text{TTA}=0,8\text{ s}$	$\text{TTA}=0\text{ s}$	$\text{TTA}=-1\text{ s}$
Mittelwert(TTC)	2,3 s	2,5 s	1,8 s	1,3 s	0,75 s
Std(TTC)	2,0 s	2,2 s	1,3 s	1,4 s	1,4 s

Tabelle 4.8: Mittelwert und Standardabweichung der TTC für die einzelnen Algorithmus-Generationen.

4.3.6 Auswirkung auf die Warnzeitpunkte

Bisher wurde die Validierung lediglich auf den True Positive- bzw. False Positive-Raten aufgebaut. Tabelle 4.7 gibt nun zusätzlich Auskunft über die Warnzeitpunkte im Vergleich zum simTD-System.

Aus der eben erwähnten Tabelle geht hervor, dass im Mittel grundsätzlich etwas später gewarnt wird, als bei der simTD-Querverkehrsassistenz. Bei einer TTA von 0.8 Sekunden und einer $t_{a,duration}$ von 1 Sekunde warnen die beiden Systeme aber beinahe gleichzeitig.

4.3.7 TTC für verschiedene Algorithmus-Generationen

In Tabelle 4.8 wird zum Abschluss noch die berechnete TTC für verschiedene Parametersätze angeführt.

4.3.8 Diskussion der Ergebnisse

Der implementierte Algorithmus kann aufgrund der hohen Anzahl an False Positives nicht verwendet werden, um einen aktiven Eingriff, zum Beispiel ein autonomes Bremsen, durchzuführen. In simTD wird im Falle einer Warnung durch das System zusätzlich zu einer Anzeige der Warnung an einem LCD-Display noch ein akustisches Signal ausgegeben, um den Fahrer auf die gefährliche Situation hinzuweisen. Diese Art der Warnung ist für das implementierte System auch nicht denkbar. Vielmehr muss ein geeigneter Ansatz erarbeitet werden, um den Fahrer auf unaufdringliche Art und Weise auf eine potentiell kritische Situation im Kreuzungsbereich hinzuweisen. Dies könnte zum Beispiel mittels LEDs in den Außenspiegeln (wie bereits bei Blind-Spot-Warnern eingesetzt) oder durch eine geeignete Anzeige im Head-up Display erfolgen.

Die entworfenen Bewertungsstufen (GIDAS, Blinker) sind sehr einfach aufgebaut und es wäre durchaus denkbar, diese auch im Fahrzeug auf einem Steuergerät zu integrieren, da sie mit sehr begrenzten Eingangsdaten und CPU-Ressourcen arbeiten können. Wie die Auswertung zeigt, können diese sehr einfach gestalteten Filter bereits einige False Positives beseitigen. Dementsprechend könnten diese Bewertungsstufen weiter verfeinert und gegebenenfalls noch fusioniert werden, um noch bessere Ergebnisse zu erzielen. Eine weitere Möglichkeit würde sich durch die zusätzliche Abschätzung des Fahrerverhaltens erge-

Längsneigung [%]	4	6	11 ⁹
Höhendifferenz zwischen den Fahrbahnen [m]	4,4	4,1	3,35

Tabelle 4.9: Höhendifferenz bei verschiedenen Längsneigungen

ben. Dazu könnten weitere Fahrzeugparameter, wie zum Beispiel der Lenkwinkel, für eine Prädiktion herangezogen werden. Dadurch könnte man zunächst mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit anhand des Verhaltens des Fahrers erkennen, ob man sich einer Kreuzung nähert bzw. im Anschluss daran auch eine Aussage über das Verhalten im Kreuzungsbereich (geradeaus oder in eine Richtung abbiegen) treffen. Somit könnte in Verbindung mit den GIDAS-Daten eine weit bessere Aussage über die Kollisionswahrscheinlichkeit getroffen werden. Eine solche Prädiktion wird zum Beispiel in [DBB03] vorgestellt.

Die Prädiktion des Fremdfahrzeugs ist aufgrund der fehlenden Gierraten-Daten natürlich nicht so genau wie erwünscht. Wie bereits erwähnt, befindet sich das Fremdfahrzeug zwar bei allen ausgewerteten Szenarien auf einer Geraden, doch kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Auswertungsergebnis durch das Fehlen dieses Sensorwertes verfälscht wurde.

Eine erhebliche Verbesserung des Warnalgorithmus könnte durch das Zuführen von Informationen über die vor dem Fahrzeug liegende Straßentopologie erfolgen. Beispielweise könnte die Information über Kreuzungsmittelpunkte im Umkreis von wenigen hundert Meter um das Ego-Fahrzeug helfen, den Schnittpunkt von prädizierten Trajektorien zu validieren. Liegt so ein Schnittpunkt nicht in der Nähe eines Kreuzungsmittelpunktes, spricht in einem Kreuzungsbereich, kann die prädizierte Kollision dementsprechend als unsicher bewertet werden. [ES13] zeigt, dass solche Daten (auch eine genauere Kreuzungstopologie) autonom gesammelt werden könnten.

Über die Parameter FSB und die Safeparams könnte der Algorithmus ebenfalls noch weiter verbessert werden. Dazu müssten aber wohl noch zusätzliche Versuchsdaten in anderen Kreuzungen gesammelt und ausgewertet werden.

In Tabelle 4.8 werden die durchschnittlichen TTCs zum Zeitpunkt der Warnung in Abhängigkeit von der jeweiligen Algorithmus-Konfiguration angeführt. Die mittlere TTC bei einer eingestellten TTA-Schwelle von 0 s liegt zum Beispiel bei 1,3 s. Daraus kann nun ermittelt werden, wie weit ein Fahrzeug vom Scheitelpunkt einer Brücke entfernt ist und damit auf die Höhendifferenz der beiden Fahrzeuge geschlossen werden. Wird eine Geschwindigkeit von 50 km/h angenommen und das in Abschnitt 4.1.2 angeführte Brückenmodell verwendet, befindet sich das Fahrzeug ca. 15 m entfernt vom Scheitelpunkt. Wird nun davon ausgegangen, dass die beiden kreuzenden Fahrbahnen zunächst auf der gleichen Höhe liegen und erst an der Überführung ansteigen, ergeben sich für verschiedene Längsneigungen die in Tabelle 4.9 angegebenen Höhenunterschiede (bei einer angenommenen Höhendifferenz zwischen den kreuzenden Fahrbahnen von 5 m).

Man erkennt, dass durch die relativ spät erfolgende Warnung, die Höhendifferenz zwischen den Fahrzeugen im Falle der angenommenen Überführung auch bei einer sehr steilen Rampe über 3 Meter liegt. Diese Differenz kann durchaus von modernen GPS-Geräten entsprechend aufgelöst werden (siehe dazu die Abschnitte 4.1.2 und 4.1.2).

Es könnte in diesem Fall also durchaus auch die GPS-Höheninformation zur Validierung einer Warnung herangezogen werden.

4.3.9 Vergleich mit der simTD-Funktion QVA

In vorhergegangenen Abschnitt wurden die Auswirkungen auf die Anzahl an TPs und FPs durch die Anwendung von verschiedenen Filterstufen bzw. durch die Variation von Parametern des Warnalgorithmus evaluiert und erörtert. In diesem Abschnitt soll nun ein abschließender Vergleich mit der simTD-Funktion QVA erfolgen.

Die im Abschnitt 4.3 präsentierten TP- bzw. FP- Raten belegen, dass der implementierte Warnalgorithmus nicht die Verlässlichkeit der QVA-Funktion erreicht. Dies war aufgrund der sehr geringen Menge an Zusatzinformationen, die zur Bewertung der vorherrschenden Straßensituation herangezogen werden konnte, auch nicht anders zu erwarten. Stehen also alle von der simTD-QVA-Funktion benötigten Daten zur Verfügung, ist diese Funktion besser geeignet, um mögliche Kollisionen frühzeitig zu erkennen.

Kann auf diese Informationen (Kreuzungstopologie, Kollisionsbereiche, usw.) aufgrund von Kommunikationsschwierigkeiten mit dem zuständigen Datenserver nicht zugegriffen werden oder sind diese Informationen veraltet (z.B.: Änderungen der Spurführung oder Änderungen der Vorrangregelung) bzw. noch gar nicht in der benötigten Form vorhanden, kann die QVA-Funktion den Fahrer in keiner Weise unterstützen.

Dies ist vor allem in den ersten Jahren nach der serienmäßigen Einführung von C2X-System problematisch, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass von Anfang an die Daten aller Kreuzungen in dieser Form zur Verfügung stehen und jederzeit für die QVA-Funktion abrufbar auf einem Server bereit liegen.

Da die im Zuge dieser Arbeit implementierte Kreuzungsassistentenfunktion nicht von diesen Daten abhängig ist, sondern nur die Informationen aus den C2C-Nachrichten der Fahrzeuge innerhalb des Empfangsbereiches verwendet, kann das System praktisch überall und zu jeder Zeit verwendet werden, um den Fahrer vor kritischen Situationen zu warnen.

Kapitel 5

Schlussbemerkungen und Ausblick

Abschließend werden die erhaltenen Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich Verkehrstelematik bezogen auf den Inhalt dieser Arbeit gegeben.

5.1 Schlussbemerkungen

Eingangs wurde die simTD-Funktion VZA vorgestellt und auf Basis von Logdaten evaluiert. Aus diesen Daten konnte kein Nachweis für eine Verbesserung (z.B.: frühzeitige Anpassung der Geschwindigkeit oder Einhalten des Tempolimits) des Fahrverhaltens durch die VZA-Funktion erbracht und damit die Wirksamkeit der Funktion nicht bestätigt werden.

Für diese Evaluierung standen leider keine Aussagen bzw. Bewertungen der VZA-Funktion von Seiten der Testfahrer vor. Für zukünftige Auswertungen sollte dies auf alle Fälle mitberücksichtigt werden, um bei der anschließenden Funktionsbewertung klare und gesichere Aussagen über die Wirksamkeit der evaluierten Funktion treffen zu können.

Im Zuge der Evaluierung der simTD-Querverkehr-Assistenz-Funktion wurden Skripte zur automatisierten Auswertung von Verkehrssituationen in den Kreuzungsbereichen des simTD-Testgeländes entwickelt, um die anschließende, manuelle Bewertung jener Situationen (vom System generierte Warnungen korrekt?) zu vereinfachen bzw. zu beschleunigen. Die Evaluierung der QVA-Funktion an sich war nicht Teil dieser Arbeit und kann dem simTD-Endbericht (derzeit noch nicht verfügbar) entnommen werden.

Des Weiteren wurden die Logdaten aus den QVA-Versuchsfahrten gefiltert und aufbereitet, um diese als Testdaten für das implementierte Kreuzungsassistenzsystem verwenden zu können. Das entwickelte Assistenzsystem sollte dabei mit möglichst wenig Zusatzdaten, allen voran Straßenkarten und Informationen zur Kreuzungstopologie, auskommen und stellt somit eine Low-Cost-Variante im Vergleich zur simTD-QVA-Funktion da.

Die fehlenden Zusatzinformationen schlagen sich im direkten Vergleich zur QVA-Funktion in einer höheren FP-Rate nieder. Durch die Verwendung von Blinker- und GIDAS-Daten konnten einige dieser FPs wieder beseitigt werden. Trotzdem arbeitet die simTD-QVA-

Funktion im direkten Vergleich verlässlicher als das entwickelte Assistenzsystem.

Dabei ist die simTD-Komponente aber von den Zusatzinformationen und deren Qualität abhängig und vor allem zu Beginn der serienmäßigen Einführung von C2X-Systemen ist davon auszugehen, dass solche Informationen nicht flächendeckend und jederzeit verfügbar sein werden. Auch bei Fahrten im Ausland, wo beispielsweise kein Kartenmaterial vorliegt, oder bei Ausfall der Kommunikationskanäle zur Übertragung von Informationen zur Kreuzungstopologie, sind für die QVA-Funktion kritisch.

Das entwickelte Assistenzsystem wäre von diesen Einschränkungen jedoch nicht betroffen und würde wie erwartet funktionieren, da es nur von den C2C-Nachrichten von Fahrzeugen in der Umgebung abhängig ist.

Es ist durchaus denkbar, das implementierte System als informierende Funktion in ein Fahrzeug zu integrieren. Aufgrund der eingeschränkten Verlässlichkeit ist ein aktives System, das in einer Gefahrensituation beispielsweise einen aktives Anbremsen durchführt, in dieser Form allerdings nicht realisierbar.

5.2 Ausblick

Die nächsten Jahre werden zeigen, inwieweit sich C2C-Communication in der Automobilindustrie bzw. im Fahrzeug etablieren kann. Dazu müssen erforderliche Normungen durchgeführt und gesetzliche Grundlagen geschaffen werden. Eine gesetzliche Verankerung kann als Startschuss für die serienmäßige Einführung von C2C- bzw. C2X-Systemen gesehen werden. Vor allem C2X-Funktionen könnten bereits zu Beginn, wenn also erst ein sehr kleiner Anteil an Fahrzeugen mit der benötigten Technologie ausgestattet ist, dabei helfen, die Autofahrer von den Möglichkeiten und dem Potential dieser Systeme zu überzeugen. Dies kann natürlich nur dann geschehen, wenn die betroffenen Straßenbetreiber die nötige Infrastruktur von Anfang an und vor allem flächendeckend zur Verfügung stellen.

Bereits heute zeichnet sich ab, dass es weltweit wohl zum Einsatz von verschiedenen C2X-Systemen mit unterschiedlichen technischen, sowie funktionellen Ausrichtungen geben wird. Der im Zuge dieser Arbeit implementierte Warnalgorithmus zeigt, dass schon mit einer sehr überschaubaren Menge an Fahrzeugparametern und Sensordaten, ein informierendes System mit zufriedenstellender Zuverlässigkeit umgesetzt werden kann. Aufgrund der begrenzten Datenmenge könnte diese Funktion wohl in jedem C2C-System Anwendung finden. Der vergleichbare simTD-Ansatz zeigt jedoch auch, dass die Zuverlässigkeit und damit natürlich auch die Wirksamkeit solcher Systeme mit zusätzlichen Daten (Kartenmaterial, usw.) erheblich gesteigert werden kann.

Anhang A

Abkürzungsverzeichnis

ABS Anti-Blockier-System

ACC Adaptive Cruise Control

API Application Programming Interface

ASFINAG Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

AU Application Unit

C2C Car-to-Car

C2I Car-to-Infrastructure

C2X Car-to-X; X steht in diesem Kontext für Fahrzeuge oder Infrastrukturkomponenten

CAM Cooperative Awareness Message; periodisch ausgesendete Statusnachricht

CCU Communication Control Unit

DENM Decentralized Environmental Notification Message

ESC Electronic Stability Control; im deutschsprachigem Raum auch ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm)

FP False Positive

GIDAS German In-Depth Accident Study

GPS Global Positioning System

GSM Global System for Mobile Communications

HMI Human-Machine Interface

IGLZ Integrierte Gesamtverkehrsleitzentrale der Stadt Frankfurt am Main

IRS ITS Roaside Station

ITS Intelligent Transport Systems

IVS ITS Vehicle Station

LCD Liquid Crystal Display

NAN Not A Number

NHTSA National Highway Traffic Safety Administration

OEM Original Equipment Manufacturer; hier: Automobilhersteller

QVA Querverkehrsassistenz

RAU Roadside Application Unit

RMS Root, Mean, Square; Bildung der Fehlerquadrate

simTD Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland

TTA Time To Avoidance

TTC Time To Collision

TCS Traction Control System; Antischlupfregelung; Traktionskontrolle

TP True Positive

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

VAPI Vehicle API (Application Programming Interface; Programmierschnittstelle)

VAU Vehicle Application Unit

VI-Server Verkehrsinformationsserver

VZ Verkehrszeichen

VZA Verkehrszeichenassistenz

VZH Verkehrszentrale Hessen

WVZ Wechselverkehrszeichen

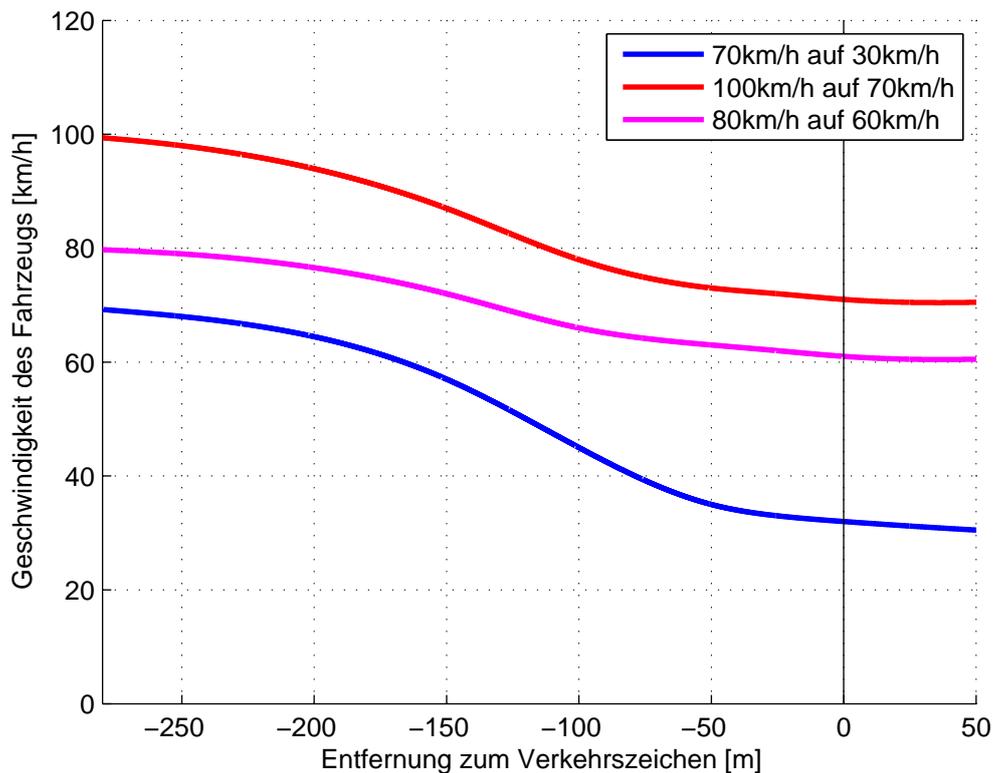
Anhang B

VZA - Ergänzungen

In diesem Abschnitt werden einige ergänzende Plots präsentiert.

B.1 VZA-Plots: idealisierte Anfahrten

Ergänzender Plot zum Abschnitt *Abweichung von der Normkurve* (siehe 2.5.4).

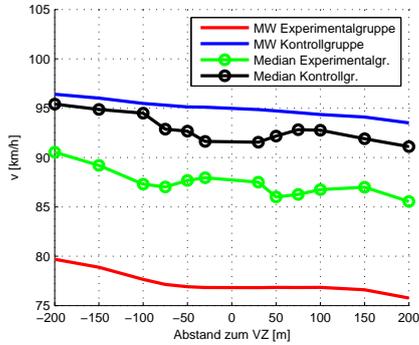


Idealisierte Anfahrten bei verschiedenen Tempolimits

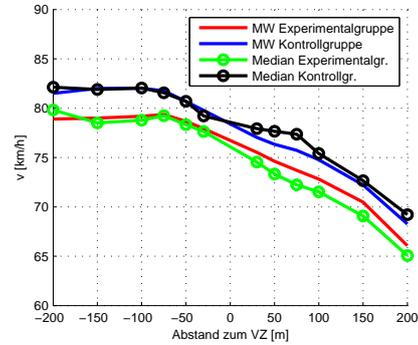
Abbildung B.1: Idealisierte Anfahrten bei verschiedenen Tempolimits

B.2 VZA-Plots: Arbeitsmodi „ohne Warnung“

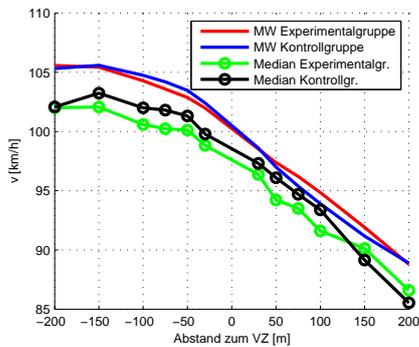
Zusätzliche Plots der VZA-Auswertung beim Arbeitsmodi „ohne Warnung“.



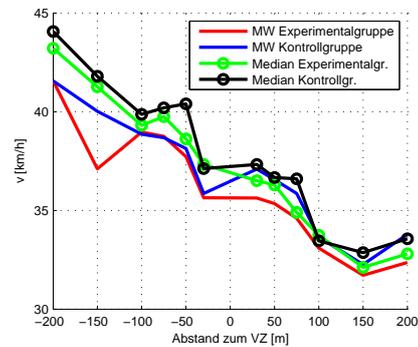
Autobahn: Konstantes Tempolimit 100km/h.



Autobahnabfahrt: Neues Tempolimit 60km/h.



Landstraße: Neues Tempolimit 70km/h.



Ortsgebiet: Neues Tempolimit 30km/h.

Abbildung B.2: Mittelwerte und Mediane der Geschwindigkeit an verschiedenen Verkehrszeichen

B.3 VZA-Plots: Arbeitsmodi „mit Warnung“

Zusätzliche Plots der VZA-Auswertung beim Arbeitsmodi „mit Warnung bei Nichtbeachtung der geltenden Verkehrsregelung“.

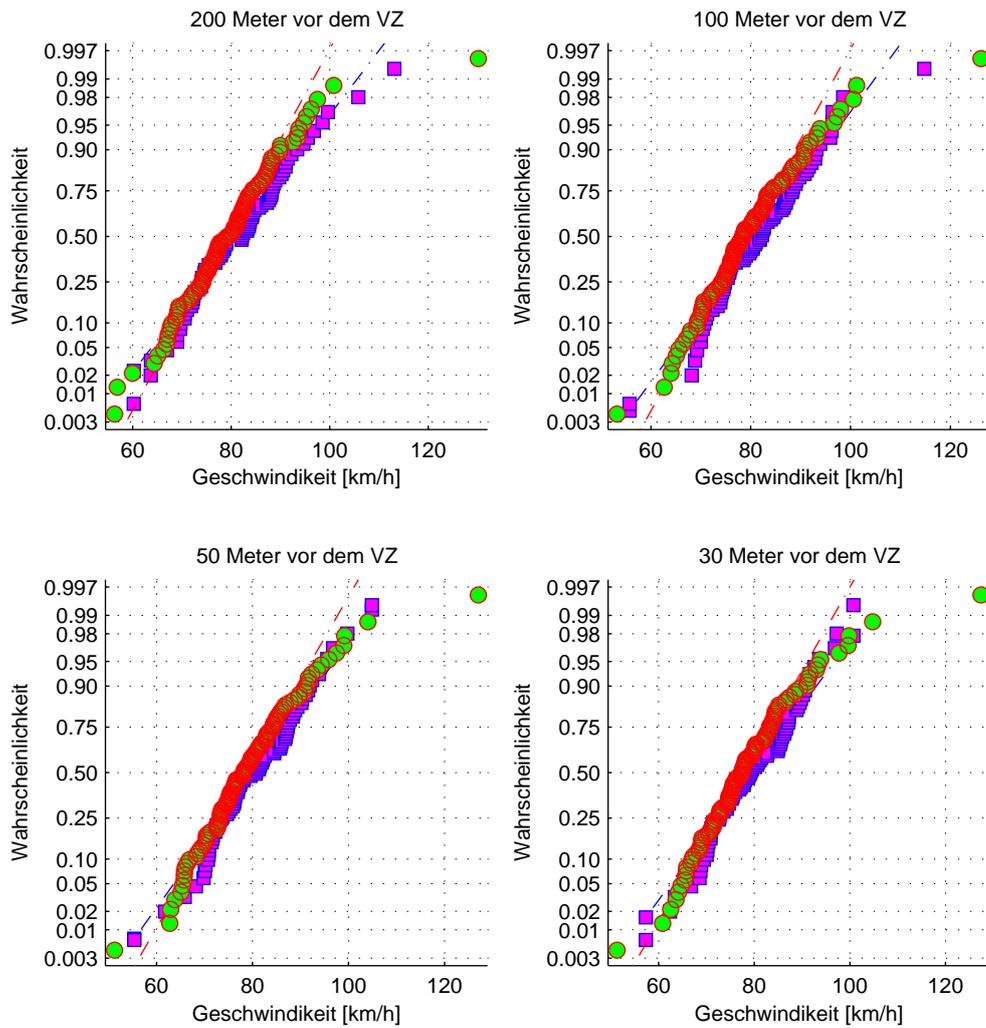


Abbildung B.3: **Autobahnabfahrt:** Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker

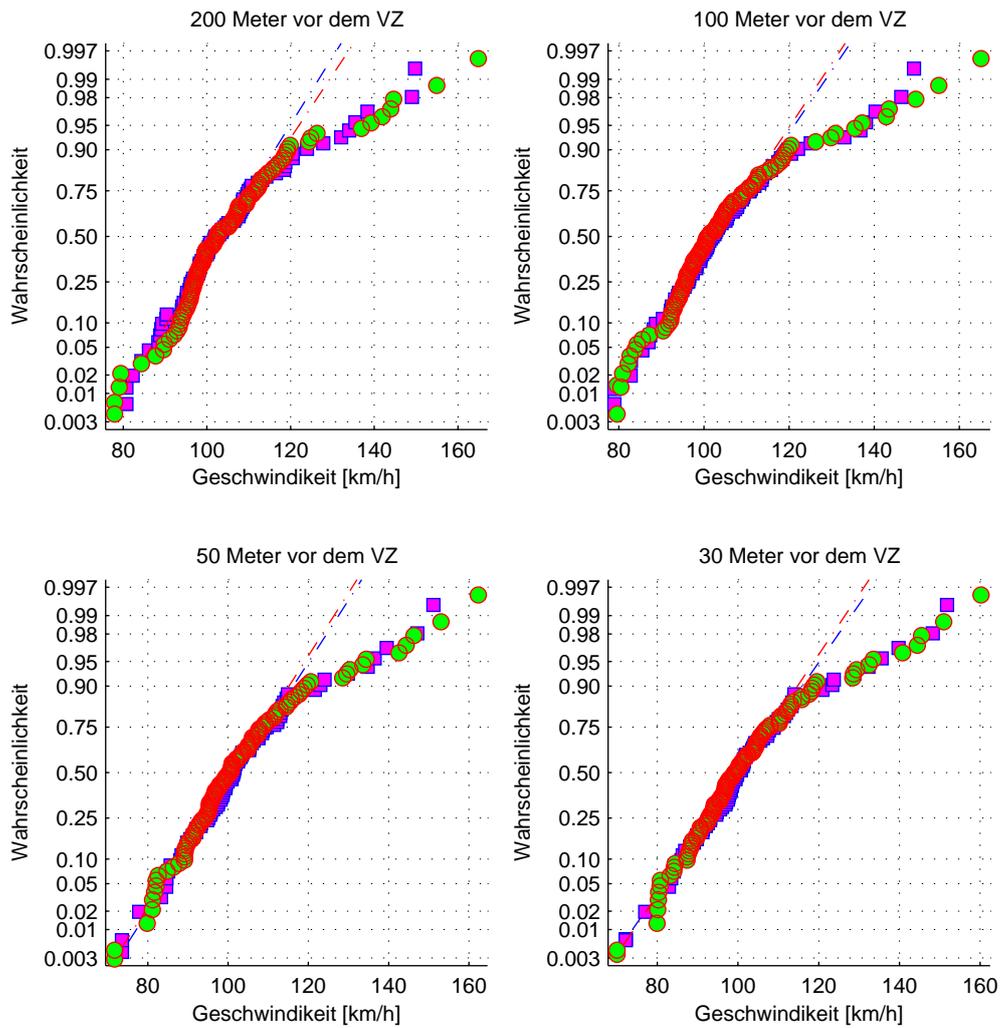
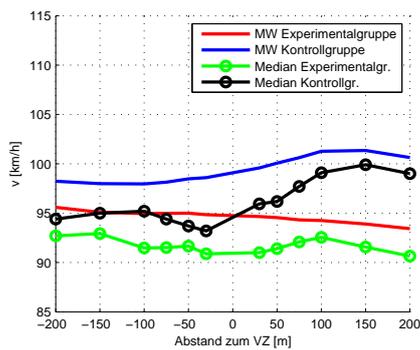
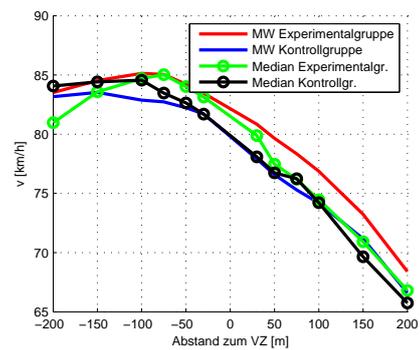


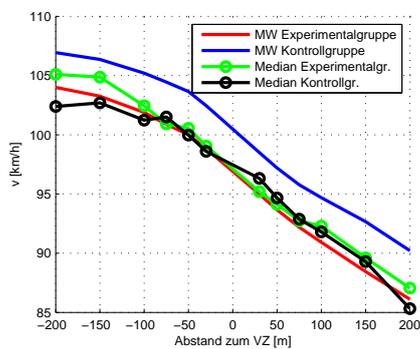
Abbildung B.4: **Landstraße**: Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker



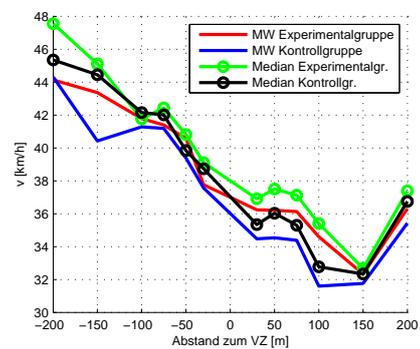
Autobahn: Konstantes Tempolimit 100km/h.



Autobahnabfahrt: Neues Tempolimit 60km/h.



Landstraße: Neues Tempolimit 70km/h.



Ortsgebiet: Neues Tempolimit 30km/h.

Abbildung B.5: Mittelwerte und Mediane der Geschwindigkeit an verschiedenen Verkehrszeichen

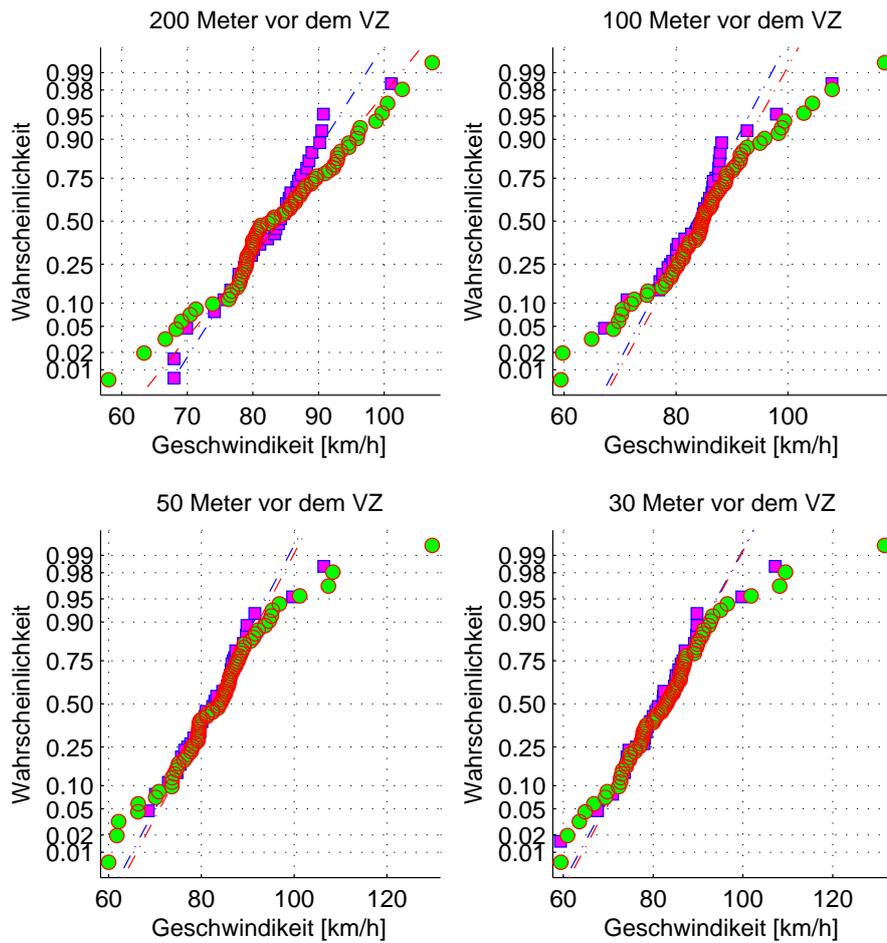


Abbildung B.6: **Autobahnabfahrt:** Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker

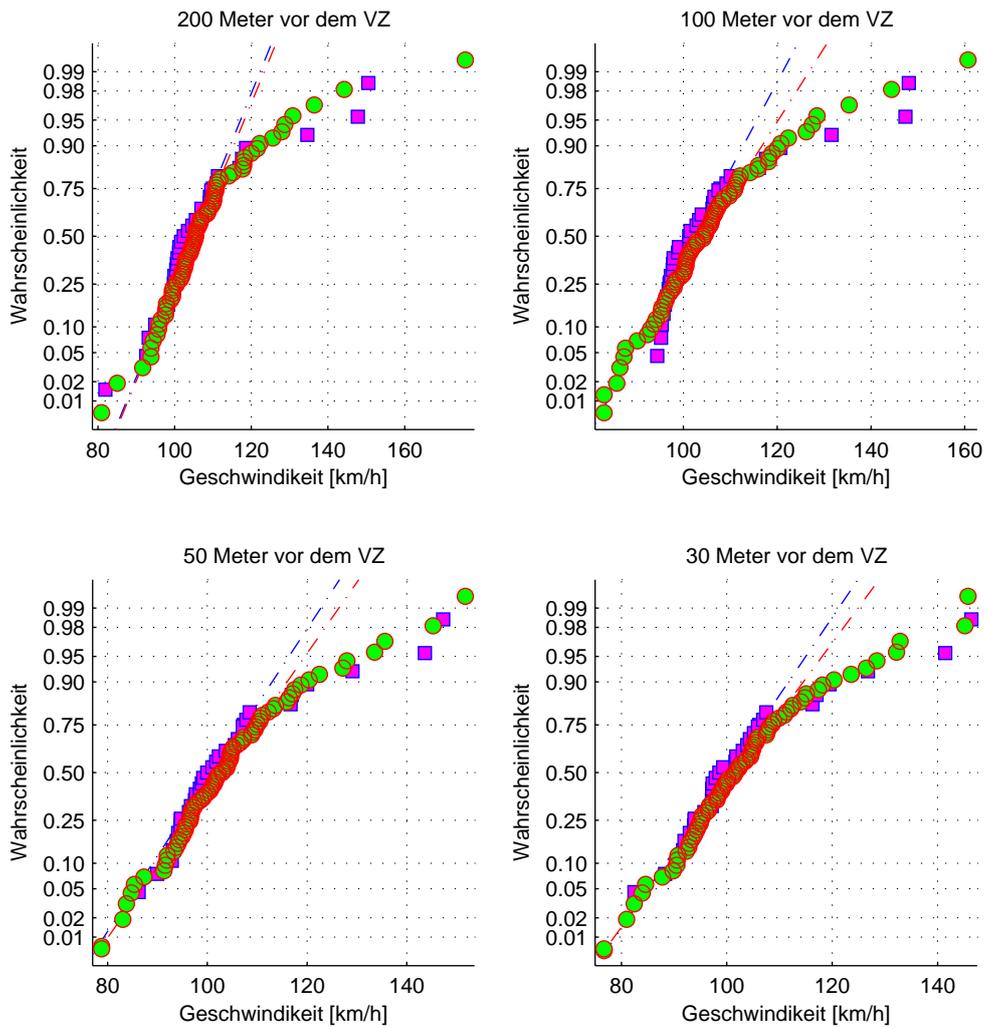


Abbildung B.7: **Landstraße:** Kontrollgruppe: Blaue Grundlinie und rechteckige Marker. Experimentalgruppe: Rote Grundlinie und kreisförmige Marker

Anhang C

USA-Algorithmus - Ergänzungen

In diesem Abschnitt werden einige ergänzende Plots präsentiert.

C.1 Zusätzliche GIDAS-Plots

Es werden ergänzende Plots zu Abschnitt 4.1.4 präsentiert.

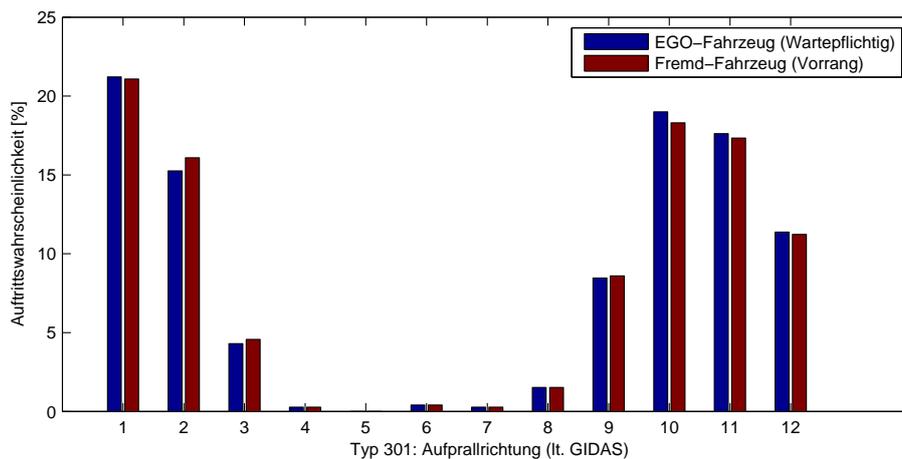


Abbildung C.1: GIDAS-Datenbank (**Unfalltype 301**): Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen.

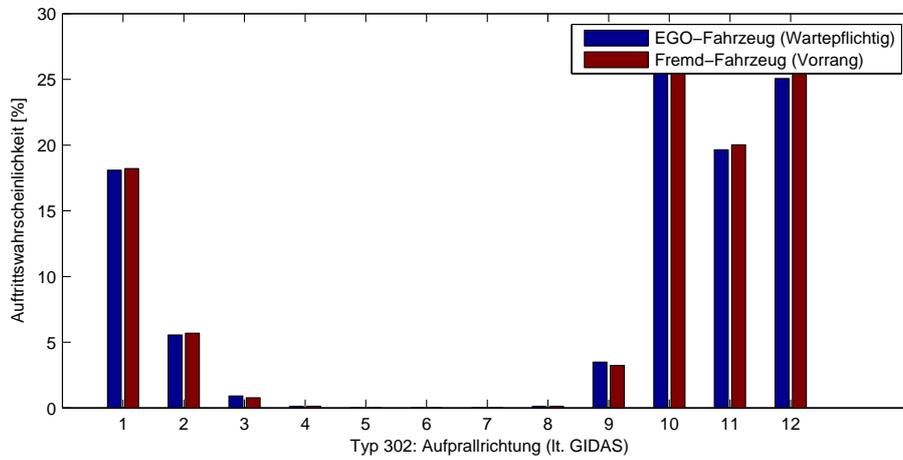


Abbildung C.2: GIDAS-Datenbank (**Unfalltype 302**): Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen.

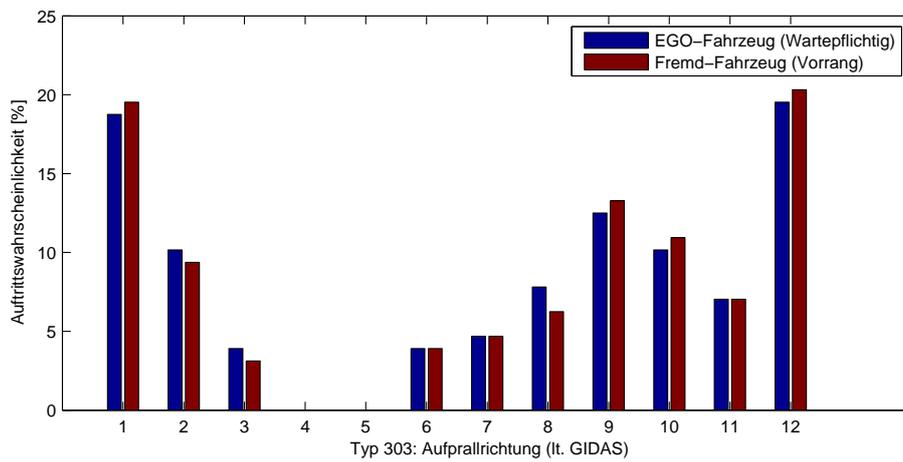


Abbildung C.3: GIDAS-Datenbank (**Unfalltype 303**): Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen.

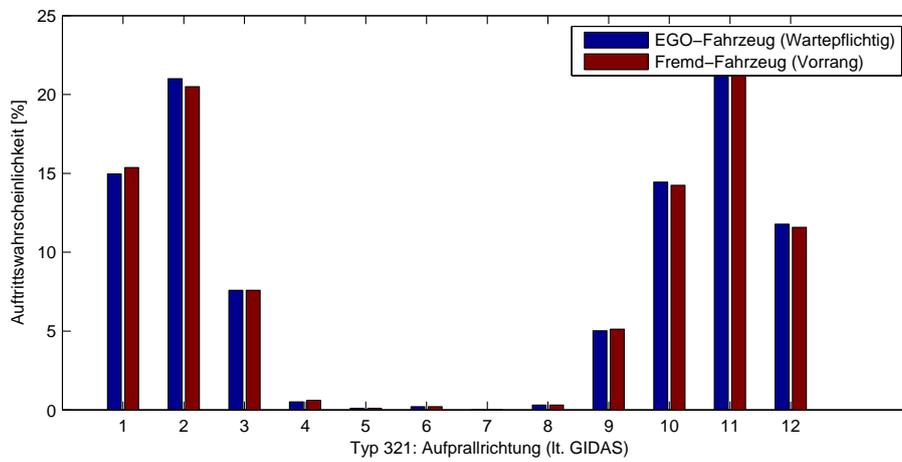


Abbildung C.4: GIDAS-Datenbank (**Unfalltype 321**): Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen.

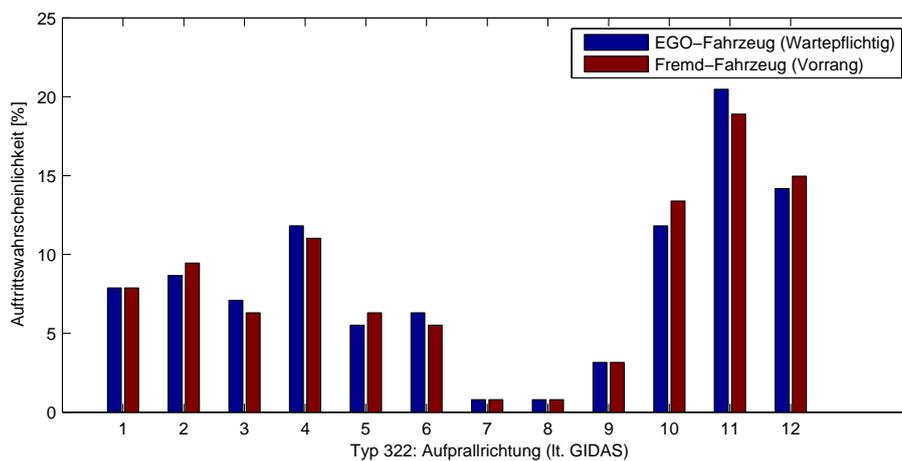


Abbildung C.5: GIDAS-Datenbank (**Unfalltype 322**): Aufprallwahrscheinlichkeit bei Kreuzungsunfällen.

Literaturverzeichnis

- [BWD07] H. Berndt, S. Wender, and K. Dietmayer. Driver braking behavior during intersection approaches and implications for warning strategies for driver assistant systems. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE*, pages 245–251, June 2007.
- [DBB03] Ismail Dagli, Michael Brost, and Gabi Breuel. Action recognition and prediction for driver assistance systems using dynamic belief networks. In *Proceedings of the NODe 2002 agent-related conference on Agent technologies, infrastructures, tools, and applications for E-services*, NODE'02, pages 179–194, Berlin, Heidelberg, 2003. Springer-Verlag.
- [Des12] Statistisches Bundesamt Destatis. Verkehr, verkehrsunfälle 2011, July 2012. Fachserie 8, Reihe 7.
- [ES13] A. Eichhorn and D. Schramm. Automatic generation of intersection topologies using numerous gps traces, 2013.
- [ETSI13] ETSI European Telecommunications Standards Institute. Dsrc. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/intelligent-transport/dsrc>, June 2013.
- [EUR13] EUREKA. Eureka prometheus project. <http://www.eurekanetwork.org/project/-/id/45>, June 2013.
- [EZN12] W. Enkelmann, P. Zahn, and K. et al. Naab. Implementierung und dokumentation der fahrzeugseitigen funktionen. In *simTD: Deliverable D22.4*, 2012.
- [EZS13] A. Eichhorn, P. Zahn, and D. Schramm. A warning algorithm for intersection collision avoidance. In *17th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications*, 2013.
- [GIDAS11] GIDAS German In-Depth Accident Study. Gidas codebook deutsch. Technical report, GIDAS, 2011.
- [Hai13] Eric Haines. Punkt-in-polygon-test nach jordan. <http://erich.realtimerendering.com/ptinpoly/>, May 2013.
- [HNM09] A. Hiller, C. Neumann, and M. et al. Mattheß. Spezifikation der kommunikationsprotokolle. In *simTD: Deliverable D21.4*, 2009.

- [JD08] D. Jiang and L. Delgrossi. Ieee 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pages 2036–2040, 2008.
- [Kal60] R. E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>, 1960.
- [Kla08] Felix Klanner. *Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug*. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt. Fachgebiet Fahrzeugtechnik., November 2008. Druckausg.: Düsseldorf : VDI-Verl., 2008. ISBN 978-3-18-368512-7 (Fortschrittsberichte VDI : Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik ; Bd. 685).
- [LBKS12] M. Liebner, M. Baumann, F. Klanner, and C. Stiller. Driver intent inference at urban intersections using the intelligent driver model. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE*, pages 1162–1167, 2012.
- [Man98] W. Mansfeld. *Satellitenortung und Navigation.: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Vieweg Friedr. + Sohn Ver, 1998.
- [Mat13] MathWorks. Documentation center: boxplot. <http://www.mathworks.de/de/help/stats/boxplot.html>, March 2013.
- [MI09] M. Mages and Verein Deutscher Ingenieure. *Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten*. Fortschritt-Berichte VDI. VDI-Verlag, 2009.
- [oTNHTSA13] U.S. Department of Transportation’s National Highway Traffic Safety Administration. Connected vehicles: Vehicle-to-vehicle (v2v) communications for safety. <http://stnw.nhtsa.gov/safercar/ConnectedVehicles/pages/v2v.html>, March 2013.
- [RA13] RITA (Research and Innovative Technology Administration). Safety pilot program overview. http://www.its.dot.gov/safety_pilot/#1, July 2013.
- [SBB09] H. Stübing, M. Bechler, and S. et al. Buchta. Konsolidierter systemarchitekturwurf. In *simTD: Deliverable D21.2*, 2009.
- [sK13] simTD Konsortium. simtd: Sichere intelligente mobilät - testfeld deutschland. <http://www.simtd.de/>, Feb 2013.
- [sKTB13] simTD Konsortium (TU Berlin). simtd: Planungstool. <https://werkzeug.dcaiti.tu-berlin.de/simtd/websce/>, Feb 2013.
- [Stu13] GIDAS (German In-Depth Accident Study). Das gidas projekt. <http://www.gidas.org/de/home>, April 2013.

- [SZA13] F. Schimandl, P. Zahn, and A. Aichhorn. Technische auswertung, teilgenauigkeit des positionierungssystems. In *simTD: Working Document W43.2*, 2013.
- [Tel13] Konsortium Testfeld Telematik. Testfeld telematik. <http://www.testfeld-telematik.at/projektbeschreibung.html>, March 2013.
- [Tuk77] John W. Tukey. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley, 1977.
- [vR07] Alexander von Reyher. *Lidarbasierte Fahrstreifenzuordnung von Objekten für eine Abstandsregelung im Stop&Go-Verkehr*. PhD thesis, TU Darmstadt, Dezember 2007.
- [WHO13] WHO. Who: Data and statistics. <http://www.who.int/research/en/>, March 2013.
- [Wie09] H. Wieker. *simtd: Anwendung im bereich der satellitennavigation*. Technical report, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Forschungsgruppe Verkehrstelematik, 2009.