

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	IV
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Technik	6
2.2 Übertragungsmethoden	8
2.3 Botschaften	11
2.3.1 Cooperative Awareness Message	11
2.3.2 Decentralized Environmental Notification Message	12
2.3.3 Signal Phase and Timing	13
2.3.4 MAP-Botschaft	14
3 Grundlagen	15
3.1 Light Detection and Ranging	15
3.1.1 Funktionsweise	15
3.1.2 Genauigkeit und Störungen	16
3.1.3 Interpretation der Daten	17
3.2 CAN - Controller Area Network	18
3.2.1 Low-Speed CAN	18
3.2.2 High-Speed CAN	19
3.2.3 Aufbau der Botschaften	20
3.2.4 Kollisionsvermeidung	22
3.2.5 Prüfsumme (CRC)	23
3.3 Globales Navigationssatellitensystem	24
3.3.1 Funktionsprinzip	24
3.3.2 Assisted GPS (A-GPS)	26
3.3.3 Frequenzen und Orbits	27
3.3.4 Genauigkeit und Störeinflüsse	29
3.4 Geodäsie	33
3.4.1 Gestalt der Erde und Gradnetz	33
3.4.2 Berechnungen	35
3.4.3 Abstand zwischen zwei Punkten	35
3.4.4 Berechnung des Azimut	36

4	Systemaufbau und Inbetriebnahme	38
4.1	Systemkomponenten	38
4.2	Inbetriebnahme der Hardware	39
4.3	Entwicklungsumgebung	39
4.4	Softwarebasis	40
4.4.1	ExampleITS	41
4.4.2	Modifikationen der exampleITS	42
5	Messung GPS-Genauigkeit und CAM-Übertragung	44
5.1	Vorbereitung und Versuchsaufbau	44
5.2	Versuche	50
5.3	Auswertung	50
5.4	Ergebnisse Geräuschemessstrecke	54
5.4.1	GPS-Drift	54
5.4.2	GPS Genauigkeit	55
5.5	Zusammenfassung GPS-Genauigkeit	59
6	Funktionsprototypen	61
6.1	Einsatzfahrzeugwarnung	62
6.1.1	Funktion und Software im Einsatzfahrzeug	63
6.1.2	Funktion und Software im Empfängerfahrzeug	65
6.2	Ampelphasenanpassung für Einsatzfahrzeuge	71
6.2.1	Grundauslegung der Ampel	71
6.2.2	Funktion der Ampelphasensteuerung	72
6.3	Präsentation bestimmter Car2X-Funktionen	74
7	Zusammenfassung und Ausblick	75

A-GPS	Assisted GPS	27
API	application programming interfaces	41
ASC	Adobe ActionScript	50
CAM	Cooperative Awareness Message	11
CAN	Controller Area Network	19
CRC	Cyclic Redundancy Check	22
CSV	Comma Separated Values	50
D-GPS	differenzielle GPS	27
DENM	Decentralized Environmental Notification Message ...	11
DIN	Deutsche Institut für Normung	14
DLC	Data Length Code	22
EOF	End of Frame	22
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema ..	84
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem	25
GPS	Global Positioning System	83
GSM	Global Systems for Mobile Communications	27
ID	Identifikator	12
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System	84
ISS	International Space Station	29
ITM	Intelligent Transport Systems	3
ITS	Intertransmission Field	22
LIDAR	Light Detection and Ranging	15
NNSS	Navy Navigation Satellite System	83
OBU	On-Board-Unit	39
RSU	Road-Side-Unit	39
RTR	Remote Transmission Request	22
SA	Selective Availability	83
SDK	Software Development Kit	40
SOF	Start of Frame	21
SPaT	Signal Phase and Timing	11
V2V	Vehicle to Vehicle	3
VM	virtuelle Maschine	40
WLAN	Wireless Local Area Network	3

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
d	°	Abstand zwischen zwei Punkten einer Kugel
d_x	m	Abstand von Fahrzeugmitte in Längsrichtung
d_y	m	Abstand von Fahrzeugmitte in Querrichtung
R	km	Erdradius
Az	°	Peilungswinkel/Azimuth
α_{Pos}	°	Positionswinkel
λ	°	Längengrad
ϕ	v	Breitengrad
$\omega_{Angriff}$	°	Angriffswinkel
ω_{Eigen}	°	Eigenkurswinkel
ω_{Gegner}	°	Kurswinkel Gegnerfahrzeug
U	V	elektrische Spannung
f	Hz	Frequenz

Abkürzungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Einführung von Car2X im Phasenmodell der Volkswagen AG.....	5
Abbildung 2.2: Verlauf Eurokorridor [4].....	5
Abbildung 2.3: ITS-Funkfrequenzen in Europa (oben) und den USA (unten)[1 (Quelle:Bosch)].....	7
Abbildung 2.4: Vernetzung verschiedener ITS-Stationen [5 (Kap. 4.1)]...8	
Abbildung 2.5: Geographic Unicast [5 Kap. (7.2.2)].....	9
Abbildung 2.6: Topological-scoped Broadcast [5 (Kap. 7.2.2)].....	9
Abbildung 2.7: Geographically-scoped Broadcast [5 (Kap. 7.2.2)].....	10
Abbildung 2.8: Geographically-scoped Broadcast mit Paketweiterleitung bis zum Zielgebiet [5 (Kap. 7.2.2)].....	10
Abbildung 2.9: Beispiel für eine Warnung über DENM-Botschaften [8]...13	
Abbildung 3.1: physikalischer Aufbau Low-Speed CAN.....	19
Abbildung 3.2: Signalpegel Low-Speed CAN [9 (Quelle: VW)].....	19
Abbildung 3.3: physikalischer Aufbau High-Speed CAN.....	20
Abbildung 3.4: Signalpegel High-Speed CAN [9 (Quelle: VW)].....	20
Abbildung 3.5: Aufbau CAN-Botschaft [11 (Quelle: Bolle)].....	21
Abbildung 3.6: Bit-Stuffing Beispiel.....	22
Abbildung 3.7: Arbitrierung Beispiel [9 (Quelle: Nosper)].....	22
Abbildung 3.8: Berechnung ID Netzknoten 3.....	23
Abbildung 3.9: Beispiel Berechnung der Prüfsumme.....	23
Abbildung 3.10: Frequenzbänder für GNSS (Stand 2008) [14].....	27
Abbildung 3.11: Orbits verschiedener GNSS-Systeme und Vergleichsobjekte [16].....	28
Abbildung 3.12: Grundlage Dillution of Precision (DOP) [17].....	30
Abbildung 3.13: DOP Pyramide [18; 19].....	31
Abbildung 3.14: Laufzeitverzögerung durch Brechung [20].....	31
Abbildung 3.15: Breitengrade (links) und Längengrade (rechts) [21; 22]	34
Abbildung 4.1: MK5 OBU (links) und RSU (rechts) mit Antennen.....	38

Abbildung 4.2: MK5 Software Blockdiagramm [25].....	40
Abbildung 4.3: Aufbau exampleITS.....	42
Abbildung 4.4: Aufbau exmampleITS (modifiziert).....	43
Abbildung 5.1: Abmessungen und Aufbau des Prüfgeländes zur Geräusch- messung [26].....	45
Abbildung 5.2: Antennenpositionen in Fahrzeugdraufsicht.....	46
Abbildung 5.3: Messtechnik und Vernetzung.....	47
Abbildung 5.4: Übertragene CAN-Geschwindigkeit über DENM-Botschaft	49
Abbildung 5.5: Korrektur der GPS-Daten.....	51
Abbildung 5.6: Objekttracking in den Laserscannerdaten.....	53
Abbildung 5.7: GPS Drift am Start- und Endpunkt.....	54
Abbildung 5.8: Vergleich Gruppe 12 Versuch 1.....	58
Abbildung 5.9: Vergleich Gruppe 1 Versuch 4.....	58
Abbildung 5.10: Vergleich Gruppe 9 Versuch 1.....	59
Abbildung 6.1: Programmablauf EVW-Sender.....	65
Abbildung 6.2: Winkel in Bezug auf Fahrtrichtung.....	66
Abbildung 6.3: Beispiel für Relevanzbetrachtung.....	67
Abbildung 6.4: Programmablauf EVW-Empfänger.....	69
Abbildung 6.5: Mockup EVW-Warnung 3D.....	70
Abbildung 6.6: Signalzeitplan.....	72
Abbildung 6.7: Ampelphasenanpassung bei EVW.....	73
Abbildung 7.1: Relevanzbereiche "vorn".....	90
Abbildung 7.2: Relevanzbereiche "vorn rechts".....	90
Abbildung 7.3: Relevanzbereiche "rechts".....	90
Abbildung 7.4: Relevanzbereiche "hinten rechts".....	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Beispiele für Car2X Projekte [1; 2]	4
Tabelle 6.1: Sub Cause Codes für Einsatzfahrzeuge	64
Tabelle 6.2: Signale der CAN-Botschaft ID 423	65
Tabelle 6.3: Winkelbereiche für Relevanzbetrachtung	69

1 Einleitung

Moderne Fahrzeuge werden dank großer Fortschritte in den Bereichen des passiven und aktiven Schutzes immer sicherer. Während passive Systeme wie Airbag, Sicherheitsgurt und Sicherheitsfahrgastzellen die Unfallfolgen für Beteiligte verringern, soll mit aktiven Systemen die Unfallschwere reduziert oder sogar der Unfall gänzlich verhindert werden.

Reaktive Systeme wie ESP oder ABS können schnell an ihre physikalischen Grenzen gelangen, da sie erst einsetzen, wenn es bereits zu einer kritischen Situation gekommen ist. Neuere aktive Systeme, wie beispielsweise Notbremsassistent oder Toter-Winkel-Assistent bieten bereits eine gewisse Vorwarn- und Vorbereitungszeit.

Die Umfeldsensorik ermöglicht es, entstehende Gefahrensituationen zu erkennen und den Fahrer zu warnen und zu unterstützen sowie das Fahrzeug auf eine mögliche Kollision vorzubereiten. Aber auch diese Systeme haben ihre Grenzen, da Informationen außerhalb des Sichtfeldes der Sensoren nicht erfasst werden oder bei schwierigen Umwelteinflüssen nicht auswertbar sind. Szenarien in denen dies zum Beispiel auftritt, sind der Querverkehr an einer uneinsichtigen Kreuzung oder starker Schneefall.

Können Fahrzeuge mit anderen Verkehrsteilnehmer oder mit der Infrastruktur kommunizieren, lässt sich ihr Sichtfeld und ihr Informationshorizont über die Grenzen der eigenen Sensoren hinaus erweitern. Sie werden zu vernetzten Fahrzeugen. Die Fahrzeuge übermitteln unter anderem allgemeine Informationen zum Fahrzeug selbst, sowie von ihm erkannte kritische Situationen und Straßenbedingungen. Die Infrastruktur kann beispielsweise Informationen zu Ampelphasen, Kreuzungsgeometrien oder Straßenbedingungen liefern. Näheres dazu in Kapitel 2.3.2.

Aus der Summe der Informationen können vernetzte Fahrzeuge schließlich ein genaueres Bild ihrer Umgebung formen und potentiell kritische Situationen erkennen, bevor sie entstehen. Die Kommunikation bietet jedoch auch Komfortaspekte für den Fahrer. So kann er zum Beispiel besser vor Staus gewarnt werden und diese umgehen oder seine Geschwindigkeit an die Ampelphasen anpassen. Die Auswertung der gesammelten Daten aller Verkehrsteilnehmer bietet außerdem unter anderem die Möglichkeit, Verkehrswege besser zu planen oder Gefahrenstellen zu erkennen.

Immer mehr Fahrzeughersteller und -zulieferer beschäftigen sich mit dem (teil-)autonomen Fahren. Auch in diesem Bereich liefert die Car2X-Kommunikation wichtige Informationen, um diese Funktionen besser realisieren zu können.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde sich mit der Inbetriebnahme der Entwicklermodule, deren Test und der Entwicklung von prototypischen Funktionen für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikationen beschäftigt. Der Fokus bei den Funktionsprototypen lag dabei auf Anwendungen welche im Zusammenhang mit Einsatzfahrzeugen stehen.

2 Stand der Technik

Die Kommunikationen zwischen Fahrzeugen wird im deutschen häufig als Car2Car (Car to Car) bezeichnet, ist jedoch international auch als V2V (Vehicle to Vehicle) bekannt. Eine weitere Möglichkeit stellt der Datenaustausch zwischen einem Fahrzeug und der Infrastruktur, beispielsweise einer Ampel oder Baustelle, dar. Dies wird als Car2Infrastructure bezeichnet. Werden beide Funktionen zusammen geführt, wird daraus Car2X beziehungsweise V2X. Wobei „X“ für alle Objekte steht, mit denen ein Fahrzeug kommunizieren kann. Im Zusammenhang mit der Integration in das Straßenleitsystem, Mautsystem oder andere Dienste wird letztlich das Gesamtsystem als „Intelligent Transport Systems“, kurz ITS, bezeichnet.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Stationen findet drahtlos statt. Infrastruktur-Module können außerdem eine drahtlose oder kabelgebundene Übertragungsmöglichkeit zu einer zentralen Stelle haben.

Die Erforschung und Entwicklung der Grundlagen von vernetzten Verkehrssystemen begann bereits Ende der 90er Jahre. Die ersten Projekte, die damit im Zusammenhang standen, beschäftigten sich mit den grundlegenden Übertragungstechniken und Technologien solcher Systeme. In der zweiten Phase wurde der Fokus auf einzelne Funktionen gelegt, die das Potential und die Machbarkeit dieser Technik demonstrieren sollten. Die nächste Phase deckte einen größeren Funktionsumfang ab und auch die Anzahl der Testobjekte wurde hochskaliert. Diese Versuche wurden in großem Maßstab im normalen Straßenverkehr durchgeführt. Die neuesten Projekte konzentrieren sich auf die Überwindung der letzten Hürden zur Einführung in die Serienproduktion und auf die Ausweitung der Kommunikationskanäle auf verschiedene Funkstandards (Wireless Local Area Network (WLAN 802.11p) und Mobilfunk). [1 (Kap. 28.1)]

Eine Zusammenstellung einiger bereits abgeschlossener und aktueller Projekte kann Tabelle 2.1 entnommen werden.

Phase	1	2	3	4
Projekte	FleetNet	CVIS	simTD	CONVERGE
	Network-on-Wheels	SAFESPOT	Safety Pilot	COMPASS4D
	PReVENT	COOPERS	DRIVE C2X	PRESERVE AdaptIVe

Tabelle 2.1: Beispiele für Car2X Projekte [1; 2]

Die Fahrzeugindustrie richtete ein Konsortium ein, welches die Entwicklung dieser Technik begleiten und leiten sollte. Das *Car-2-Car Communication Consortium*, kurz C2C-CC, wurde von den sechs großen Automobilkonzernen Audi, BMW Group, Fiat, Volkswagen, Renault und Daimler-Chrysler ins Leben gerufen. Heute gehören neben weiteren Automobilherstellern auch zahlreiche Zulieferer und Forschungseinrichtungen dem Konsortium an. [2]

Die Einführung der Car2X-Technik in den normalen Endkundenmarkt wird im Laufe der nächsten Jahre beginnen. Dabei wird die Anzahl und Komplexität der Funktionen phasenweise vergrößert. Dies ist unter anderem notwendig, da bestimmte Funktionen, wie beispielsweise der Kreuzungsassistent, auf eine ausreichend große Ausstattungsrate angewiesen sind, um effektiv und sicher ihre Aufgabe zu erfüllen.

Am Anfang werden daher Funktionen stehen, die keinerlei sicherheitskritische autonome Eingriffe vornehmen, sondern lediglich dem Fahrzeugführer Hinweise und Warnungen zeigen. Eine der ersten Funktionen wird die Warnung vor Baustellen sein, aber auch der Hinweis zu Ampelphasen für die Optimierung des Verkehrsflusses. In Abbildung 2.1 ist ein Phasenmodell zur Einführung von Car2Car-Systemen zu sehen. Anhand der Abbildung erkennt man außerdem den Einfluss, den die Politik und die Automobilhersteller auf die Ausstattungsrate haben können.

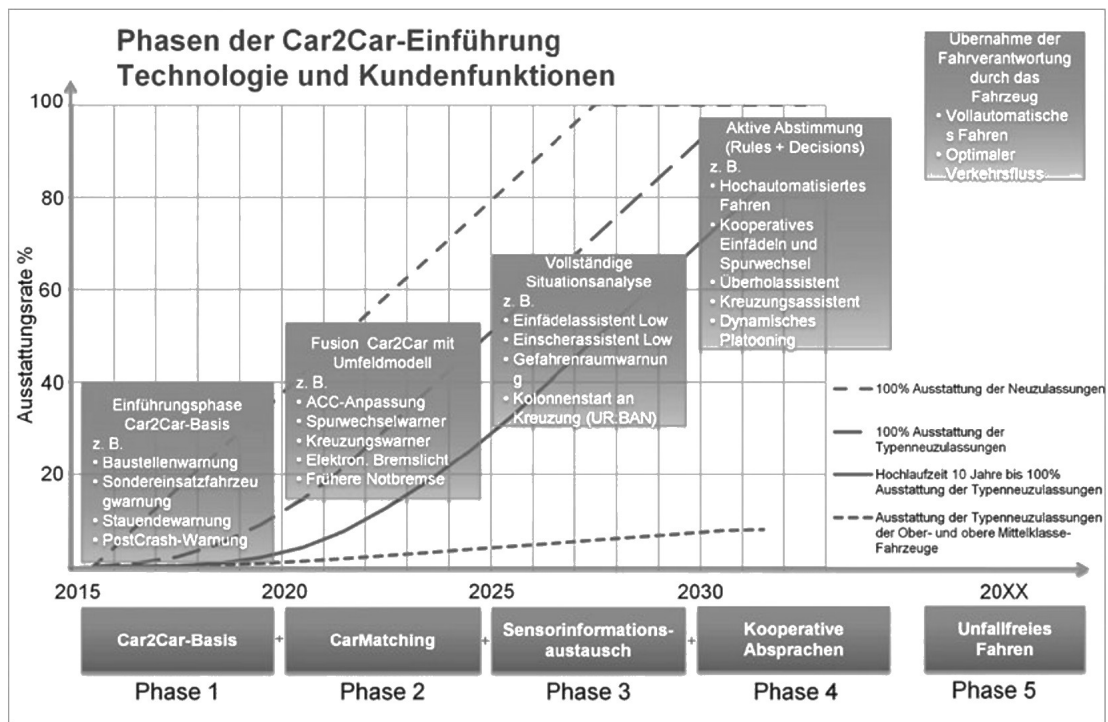


Abbildung 2.1: Einführung von Car2X im Phasenmodell der Volkswagen AG

[3 (Kap. 28.1)]

Um die Markteinführung rasch voranzubringen, unternehmen die Automobilindustrie und der Staat gemeinsame Anstrengungen. Auf Industriebene haben die Unternehmen eine Selbstverpflichtung zur Kooperation bei der Entwicklung von Car2X-Systemen erklärt. Von staatlicher Seite ist eine erste Pilotstrecke, der Eurokorridor (Cooperative ITS Corridor), geplant. Auf dieser Route zwischen Rotterdam, Frankfurt am Main und Wien sollen ab 2015 alle Baustellen mit Car2X-Modulen ausgestattet werden. Neben der Baustellenwarnung soll auch eine Verkehrslageerfassung stattfinden. Der grobe Verlauf des Eurokorridors ist in Abbildung 2.2 zu sehen. [4]



Abbildung 2.2: Verlauf Eurokorridor [4]

Wichtig für den Erfolg von Car2X ist auch die herstellerübergreifende Kommunikationsfähigkeit der Systeme. Dies ermöglicht eine schnellere Marktdurchdringung und somit zügige Erhöhung des Mehrwertes für den Fahrzeugführer. Aus diesem Grund spielt die Normung der Übertragungswege eine wichtige Rolle. An der Festlegung von Funkstandards, Botschaftstypen und Funktionen sind mehrere unterschiedliche Normungsinstitute beteiligt. Während die Normen zu den verwendeten Funkstandards meist bereits fertig ausgearbeitet sind, befinden sich die Dokumente für die Spezifikation der Botschaftstypen und Funktionen zum Teil noch in der Ausarbeitungsphase.

2.1 Technik

Die Datenübertragungstechnik für eine sichere Verbindung hat einige technische Hürden zu überwinden. So müssen bei der Entwicklung beispielsweise Mehrwegeeffekte, ähnlich wie bei der Satellitennavigation (siehe Kapitel 3.3.4), aber auch Dopplerverschiebungen berücksichtigt werden. Auch der schnelle Aufbau eines dezentral organisierten Netzwerkes mit ständig wechselnden Kommunikationspartnern sowie der Datenschutz stellen eine Herausforderung dar. Bei den sogenannten Ad-Hoc-Netzwerken gibt es keine Hierarchie, sodass alle Netzwerkteilnehmer gleichberechtigt ihre Nachrichten versenden. Die Adressierung der Botschaften zu den jeweiligen Empfängern geschieht über verschiedene Übertragungsmethoden, welche unter Kapitel 2.2 genauer betrachtet werden. [1 (Kap. 28.2)]

Für die Funkübertragung im Nahbereich kommt eine auf dem WLAN Standard IEEE 802.11a basierender WLAN-Verbindung zum Einsatz. Die Erweiterung WLAN 802.11p wurde speziell für die Car2x-Kommunikation normiert. Die Funktechnologie wird als C-ITS bezeichnet. Sie nutzt unter anderem auch *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, eine Methode, bei der durch Verteilung der Datenströme auf verschiedene schmale Frequenzbänder eine hohe Zuverlässigkeit erreicht werden kann. [1 (Kap. 28.2)]

In den USA und Europa wurden ähnliche Frequenzbänder für die Car2X-Kommunikation reserviert. Diese sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

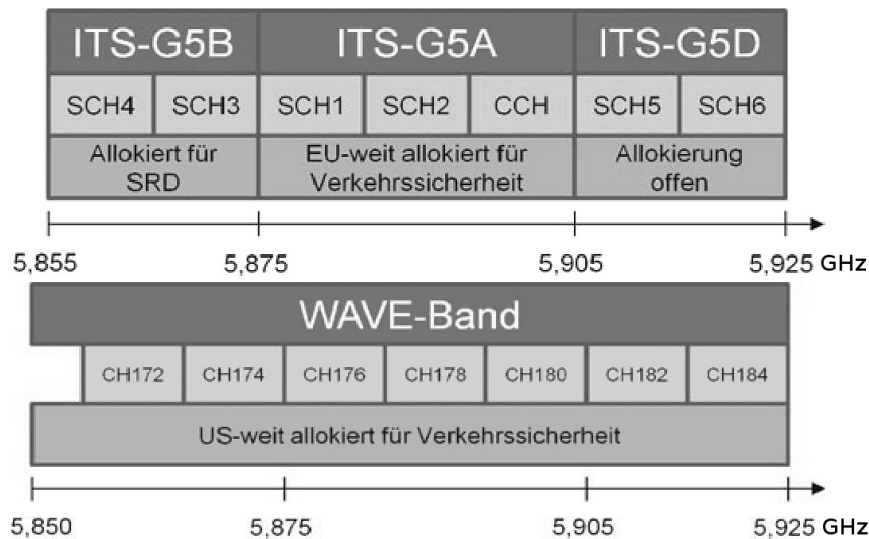


Abbildung 2.3: ITS-Funkfrequenzen in Europa (oben) und den USA (unten)

[1 (Quelle: Bosch)]

In Europa ist vorerst nur das 30 MHz Frequenzband ITS-G5A von 5,875 bis 5,905 GHz vorgesehen. Die Option zur Erweiterung bei Bedarf steht jedoch offen. Das ITS-G5A-Band unterteilt sich in zwei Servicekanal (SCH) und einen Kontrollkanal (CCH) zu je 10 MHz. Die USA haben einen 75 MHz Bereich von 5,850 bis 5,925 GHz für die Kommunikation von intelligenten Verkehrssystemen freigegeben. Das WAVE-Band untergliedert sich in 14 verschiedene Kanäle. [1 (Kap. 28.2)]

Die Reichweite der WLAN-Verbindung ist vor allem von der Umgebung abhängig. Im offenen Gelände sind Reichweiten von 250 bis 500 m im Bereich des Möglichen. In innerstädtischer Umgebung kann die Reichweite durch Abschattungen drastisch sinken. Reichweiten von 40 bis 80 m sind hier realistisch. Die verringerte Reichweite kann durch die Vielzahl an möglichen Zwischenstationen, aufgrund der höherer Verkehrsdichte, kompensiert werden. [1 (Kap. 28.2)]

Neben der Kommunikation mittels WLAN im Nahbereich sollen auch weitere Funkdienste, wie beispielsweise Mobilfunkverbindungen genutzt werden, um Daten auch über größere Distanz versenden zu können.

Die kommunizierenden ITS-Stationen werden in unterschiedliche Gruppe eingeteilt. Zum einen sind dies Infrastruktur-Stationen und zum anderen die mobilen Stationen. Zur Infrastruktur zählen *Roadside ITS Stations* (Road Side Units) und *Central ITS Stations*. Zu ersteren zählen unter anderem Stationen an Schilderbrücken, Lichtsignalanlagen und stationären Baustellen. *Central ITS Stations* stellen das Rückgrat der Ver-

kehrsinfrastruktur dar und sind beispielsweise Verkehrsleitzentralen. [1 (Kap. 28.3)]

Die mobilen Stationen lassen sich in *Vehicle ITS Stations* (On Board Units), welche in Fahrzeugen verbaut sind, und *Personal ITS Stations* unterteilen. Die *Personal ITS Stations* sollen zukünftig eine Möglichkeit darstellen, auch andere Verkehrsteilnehmer einzubeziehen. Denkbar ist beispielsweise die Nutzung von Smartphones. [1 (Kap. 28.3)]

Wie die Vernetzung der Stationen untereinander in Zukunft aussehen könnte, ist Abbildung 2.4 entnehmbar.

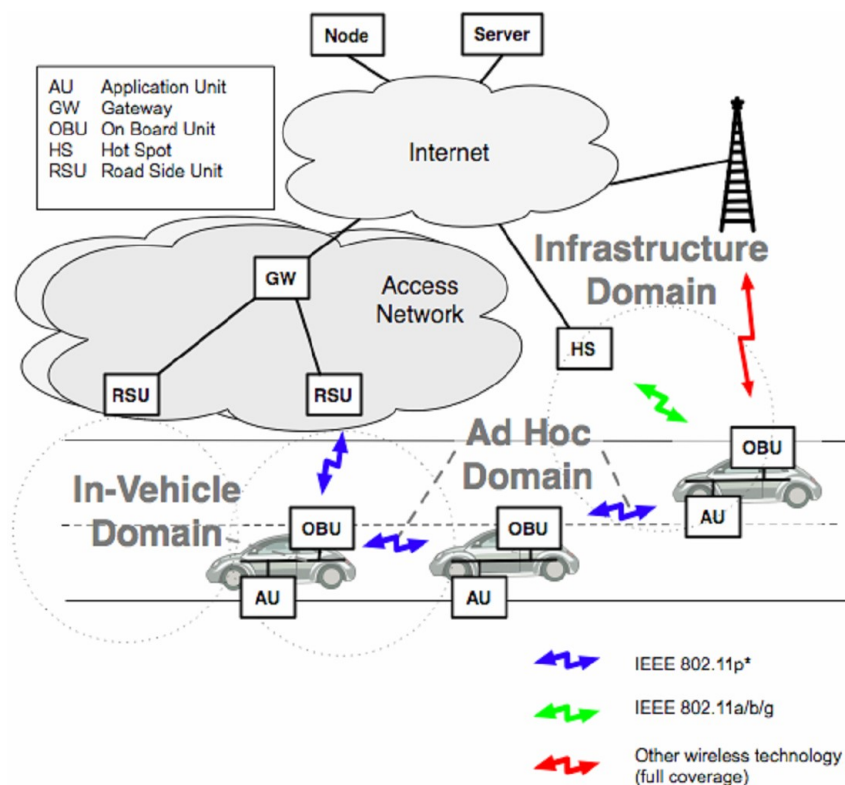


Abbildung 2.4: Vernetzung verschiedener ITS-Stationen [5 (Kap. 4.1)]

2.2 Übertragungsmethoden

Je nach Situation kann es notwendig sein, nur bestimmte Fahrzeuge zu benachrichtigen oder auch alle Fahrzeuge in einem bestimmten Umkreis. Die Weiterleitung von Botschaften dient außerdem dazu, die Kommunikationsentfernung über die Reichweite des WLAN hinaus zu erhöhen.

Das Manifest des C2C Communication Consortium definiert aktuell drei verschiedene Algorithmen zur Paketweiterleitung zwischen den verschiedenen ITS Stationen. [5 (Kap. 7.2.2)]

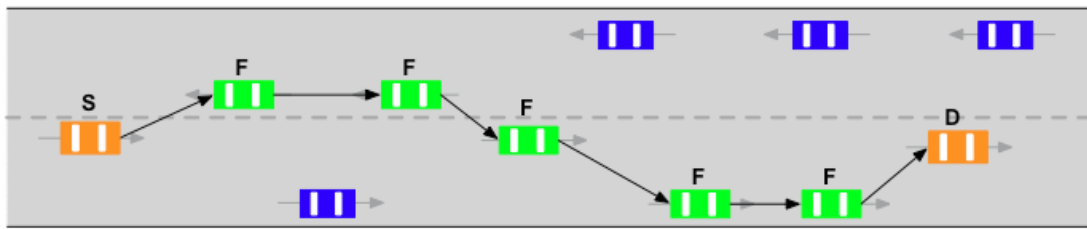


Abbildung 2.5: Geographic Unicast [5 Kap. (7.2.2)]

Abbildung 2.5 zeigt das „Geo Unicast“-Verfahren. Dabei werden die Daten von der Quelle (Source [S]) so lang über Zwischenstationen weitergeleitet (Forwarding [F]), bis die Zielstation (Destination [D]) erreicht ist. Ein mögliches Beispiel für die Nutzung dieser Methode wäre die Weiterleitung einer Stauwarnung bis zur nächstgelegenen RSU und letztlich zum Verkehrsleitzentrum. Eine andere potentielle Nutzungsmöglichkeit könnte das gezielte „Ansprechen“ eines Verkehrsteilnehmers sein, der eine Rettungsgasse blockiert. [5 (Kap. 7.2.2)]

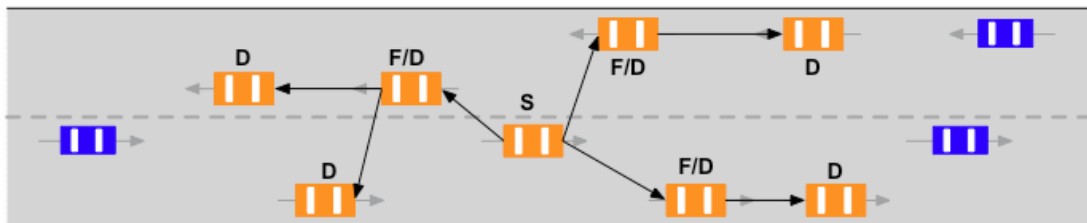


Abbildung 2.6: Topological-scoped Broadcast [5 (Kap. 7.2.2)]

Das in Abbildung 2.6 gezeigte *Topological-scoped Broadcasting* oder auch als *Multi-Hop-Verfahren* bezeichnet, wird genutzt, um eine bestimmte Anzahl von Verkehrsteilnehmern im Umkreis um den Sender zu benachrichtigen. Dabei besitzen die Botschaften ein Hop-Limit, welches festlegt, wie oft diese weitergeleitet werden. Für Abbildung 2.6 entspricht das Hop-Limit 2. [5 (Kap. 7.2.2)]

Eine große Einsatzvielfalt bietet das *Geographically-scoped Broadcasting*. Bei dieser Methode werden alle Fahrzeuge innerhalb eines bestimmten Zielgebietes benachrichtigt. Die Anzahl der Weiterleitungen wird nur durch die Grenzen des Zielgebietes limitiert. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich, unabhängig von der Verkehrsdichte, alle Fahrzeuge zu erreichen, für die eine Botschaft relevant sein könnte. Man unterscheidet dabei zwei mögliche Fälle. [5 (Kap. 7.2.2)]

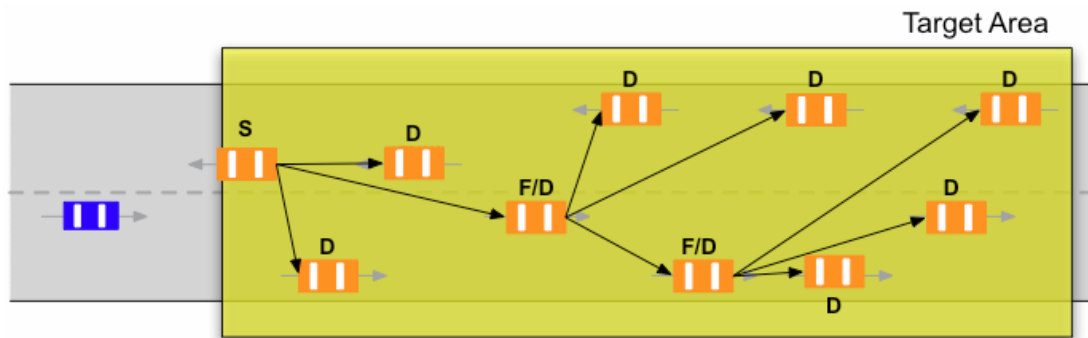


Abbildung 2.7: Geographically-scoped Broadcast [5 (Kap. 7.2.2)]

Im ersten Fall befindet sich die Quelle innerhalb des Zielgebietes (siehe Abbildung 2.7). Ein Beispiel dafür ist die Warnung vor einem Stauende auf der Autobahn. Das Fahrzeug, welches einen Stau erkennt, sendet eine Botschaft aus, die alle in einem Gebiet hinter dem Stauende ankommende Fahrzeuge vor dieser Gefahr warnt. Für die Weiterleitung können dabei auch Fahrzeuge auf der Gegenseite genutzt werden, welche die Nachricht zwar weiterleiten sie jedoch selbst nicht auswerten. In Abbildung 2.7 wurde diese Unterscheidung der Fahrrichtungen jedoch nicht vorgenommen. [5 Kap. 7.2.2]

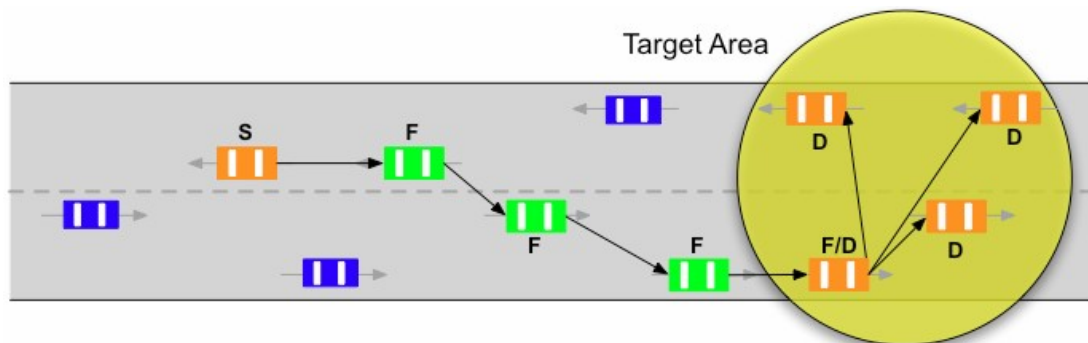


Abbildung 2.8: Geographically-scoped Broadcast mit Paketweiterleitung bis zum Zielgebiet [5 (Kap. 7.2.2)]

Abbildung 2.8 zeigt eine weitere Form des *Geographically-scoped Broadcasting*. In diesem Fall befindet sich die Quelle außerhalb des Zielgebietes. Die Botschaft wird bis zum Zielgebiet weitergeleitet und dort verteilt. Ein mögliches Einsatzszenario wäre die Weiterleitung einer zentral erfassten Glättewarnung von einer RSU bis zum Zielgebiet. Da jedoch das Erreichen der Botschaft nicht sicher ist, werden noch andere Möglichkeiten geprüft. [5 (Kap. 7.2.2)]

2.3 Botschaften

Bisher wurden bereits einige verschiedene Botschaftstypen vorgeschlagen und normiert. Teilweise werden diese verschiedenen Typen auch von unterschiedlichen Normungsinstituten ausgearbeitet.

Es gibt zwei Nachrichten, welche die Basis der Car2X-Kommunikation bilden. Dies ist zum einen die *Cooperative Awareness Message*, kurz CAM und zum anderen die *Decentralized Environmental Notification Message*, kurz DENM.

Daneben gibt es weitere Botschaftstypen, die zur Übermittlung verschiedenster Funktionen genutzt werden können. Wichtige weitere Botschaften sind die *Signal Phase and Timing*, kurz *SPaT-Botschaft*, zur Übermittlung von Ampelphasen und die MAP-Botschaft zur Übermittlung der Kreuzungsgeometrie.

2.3.1 Cooperative Awareness Message

CAM-Botschaften sind ein wichtiger Baustein der Kommunikation zwischen den einzelnen ITS-Stationen. Die Nachrichten werden von jeder Station regelmäßig gesendet. Die Anforderungen senderseitig sind gering, da lediglich bestehende Informationen verschickt werden. Die Auswertung und Relevanzbetrachtung auf der Empfängerseite stellt jedoch einen großen Aufwand dar. Da CAM-Botschaften nur die Stationen in unmittelbarer Nähe betreffen, werden sie nicht vom Empfänger weitergeleitet. Es wird also kein Hopping betrieben. [6; 1 (Kap. 28.5)]

Die CAMs beinhalten Informationen über die Art der ITS-Station, deren Position, die Bewegungssituation und weitere Informationen. Wichtig ist auch die *Station ID*, welche zur Zuordnung aller Botschaften zu einer Station genutzt wird. Je nach Art der *ITS Station* werden verschiedene Werte als obligatorisch vorgeschrieben sowie optionale Werte ergänzt. Manche Werte sind auch nur in bestimmten Situationen obligatorisch. Die vollständige Auflistung und Erklärung der verschiedenen Werte ist in der ETSI TS 102 637-2 Abschnitt 7.2 normiert. [6]

Wie oft eine CAM-Botschaft gesendet wird, ist situationsabhängig. Es gibt festgeschriebene Regeln, nach denen die Taktung gesteuert wird. Grundsätzlich werden CAM-Botschaften mit einer Frequenz zwischen 1 und 10 Hz gesendet. Eine CAM-Botschaft wird ausgelöst, wenn sich die

Bewegungsrichtung um mehr als 4° zur letzten CAM ändert, mehr als 5 m zurückgelegt werden oder sich die Geschwindigkeit um mehr als 1 m/s ändert. Ob eine dieser Regeln zutrifft, wird alle 100 ms geprüft, dies entspricht auch dem minimalen Intervall. Bei bestimmten Ereignissen wird die Häufigkeit der Nachrichten heraufgesetzt, sodass auch CAM-Botschaften gesendet werden, obwohl keine der Regeln erfüllt wurde. So wird beispielsweise bei Warnung vor einem Einsatzfahrzeug, Warnung bei Kollisionsgefahr und Kreuzungskollisions-Warnung die Frequenz auf 10 Hz erhöht, um genauere Berechnungen zu erlauben. [6]

2.3.2 Decentralized Environmental Notification Message

DENM-Botschaften werden vor allem für die Warnung vor gefährlichen Straßensituationen genutzt. Sie sind situationsgesteuert und werden nur dann erzeugt, wenn ein Ereignis, beispielsweise ESP Auslösung, eintritt. Sie werden entsprechend den in Abschnitt 2.2 genannten Übertragungsmethoden weitergeleitet. Die korrekte Detektion einer Situation stellt hohe Anforderungen an den Sender, DENM-Botschaften werden so lange wiederholt gesendet, bis erkannt wird, dass die Situation aufgehoben ist oder die Relevanzzeit überschritten wurde. Ob das Senden von DENM-Botschaften durch einen Befehl abgebrochen wird oder nach einer bestimmten Zeit abläuft, ist abhängig vom erkannten Ereignis.

Beim erstmaligen Versenden der Botschaft eines bestimmten Ereignisses, bekommt diese eine neue *ActionID*. Dieser Identifikator, kurz ID, wird für alle folgenden Botschaften verwendet. Dadurch lassen sich die Nachrichten einem bestimmten Ereignis zuordnen. Erst wenn die Zeitlücke zwischen dem Versenden zweier Nachrichten die Gültigkeitsdauer überschreitet oder ein neues Ereignis eintritt, wird eine neue *ActionID* zugeteilt.

Der Aufbau dieses Botschaftstyps ist in ETSI TS 102 637-3 standardisiert. Die Botschaft untergliedert sich in verschiedene Container. Der Management-Container, beinhaltet ähnliche Informationen wie die CAM-Botschaften, also beispielsweise den Typ der Station und einen Zeitstempel. [7 (Kap. 6.1)]

Anschließend folgt der Situations-Container. Er enthält Informationen zum Ereignis selbst. Wichtig dabei ist vor allem der *Cause Code* und der *Sub Cause Code*. Der *Cause Code* gibt die Art des Ereignisses an. Bei-

spiele dafür sind Warnungen vor Einsatzfahrzeugen, gefährlichen Straßenbedingungen, Unfällen, Staus, Baustellen und so weiter. Der *Sub Cause Code* ermöglicht eine detailliertere Untergliederung der Ursache. Eine Übersicht über die aktuell spezifizierten Ereignis gibt der Standard ETSI TS 102 869-1 Abschnitt A5.2. Je nach Ereignis werden zusätzliche Daten eingebunden. Möglich sind hier zum Beispiel Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrbahnbeschränkungen oder auch die Angabe, für welche Fahrtrichtung das Ereignis relevant ist. [7 (Kap. 6.1)]

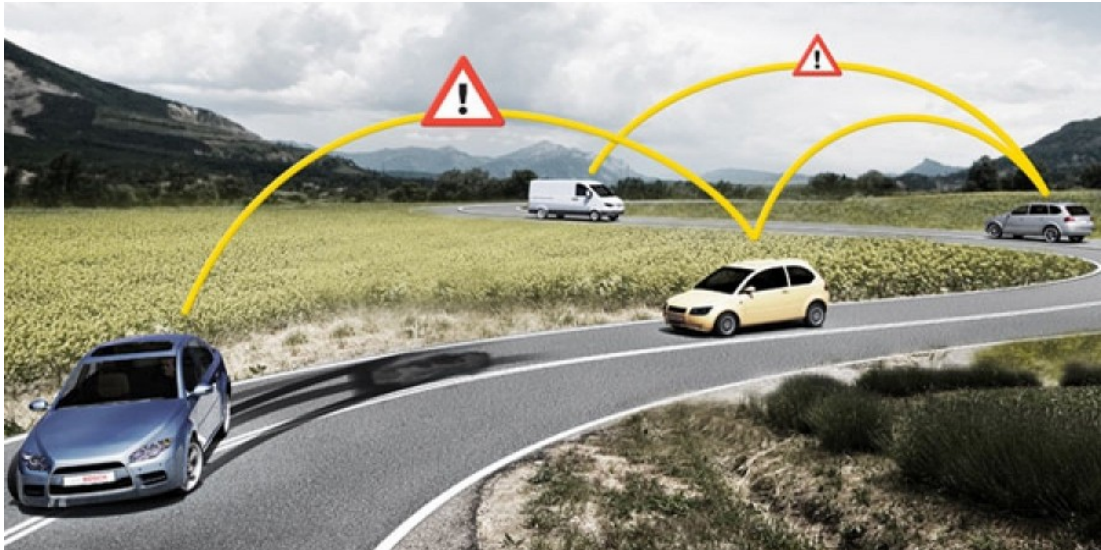


Abbildung 2.9: Beispiel für eine Warnung über DENM-Botschaften [8]

Der Event-Container beinhaltet die Position des Ereignisses sowie den Relevanzbereich und die Art der Positionsbestimmung. [7 (Kap. 6.1)]

2.3.3 Signal Phase and Timing

SPaT-Botschaften dienen der Übermittlung von Informationen der Lichtsignalanlagen. Die Botschaft enthält Informationen zu den Ampelphasen sowie den Schaltzeiten des jeweiligen Lichtsignals. Die Lichtsignale sind dabei in Gruppen zusammengefasst. Des Weiteren wird eine Kreuzungs-ID übermittelt. Diese ID ist identisch mit der ID, welche in den Map-Botschaften übermittelt wird. Damit wird eine Zuordnung der Lichtsignalanlagen zur jeweiligen Kreuzungsgeometrie ermöglicht.

Die Übermittlung dieser Informationen ermöglicht es den Verkehrsteilnehmern abzuschätzen, ob ein Passieren der Kreuzung während der Grünphase noch möglich ist oder ob es sich lohnt, bereits die Geschwindigkeit zu reduzieren. Dadurch soll der Verkehrsfluss verbessert und die Umwelt geschont werden. Außerdem stellt die Erkennung der Ampelphase bei schlechten Lichtverhältnissen sowohl für menschliche Fahrer,

als auch autonome Fahrzeuge eine Herausforderung dar. An dieser Stelle können SPaT-Botschaften Abhilfe schaffen.

2.3.4 MAP-Botschaft

MAP-Botschaften enthalten die Geometrie einer Kreuzung. Diese Geometrie wird für alle Fahrspuren separat beschrieben. Die Beschreibung funktioniert über die Definition eines Anfangs- und eines Endpunktes und die Zuordnung bestimmter Eigenschaften.

Sowohl MAP-, wie auch SPaT-Botschaften befinden sich zur Zeit noch im Standardisierungsprozess. Zuständig dafür ist das „Deutsche Institut für Normung“, kurz DIN. Eine entsprechende Norm ist DIN CEN ISO/TS 18750.

3 Grundlagen

3.1 Light Detection and Ranging

Light Detetcion and Ranging, kurz LIDAR, ist ein optisches Messverfahren zur Bestimmung von Entfernungen. Es wird genutzt, um die Position von Objekten im Raum zu bestimmen.

3.1.1 Funktionsweise

Das im Fahrzeugbereich am häufigsten eingesetzte Prinzip ist die „Time of Flight“-Messung. Diese entspricht einer Zweiwege-Entfernungsmessung. Der Laserscanner sendet einen Lichtimpuls aus, welcher von eventuellen Objekten reflektiert wird. Die reflektierten Lichtimpulse werden über Photodioden empfangen. Der Laserscanner ermittelt dann die Zeit, die zwischen dem Aussenden und dem Empfangen des Impulses vergangen ist. Multipliziert man diese Zeit mit der Lichtgeschwindigkeit in Luft, also etwa 299.710 km/s, so erhält man die doppelte Entfernung zum Objekt. In dieser einfachen Form wird die Laserentfernungsmessung beispielsweise im Baubereich eingesetzt. [1 (Kap. 18.1)]

Für die Bestimmung vieler Punkte im Raum werden oft ein rotierende und sich verkippende Spiegel eingesetzt. Der Rotationswinkel und der Kippwinkel können dazu verwendet werden, den Messpunkt im Raum zu triangulieren. Durch die Rotation wird die Umgebung punktlinienförmig abgetastet. Durch das Verkippen des Spiegels können mehrere übereinanderliegende Ebenen abgetastet werden. Es ergibt sich eine Punktwolke, welche die im Sichtfeld befindlichen Objekte abbildet.

Zum Einsatz kommen Laser mit verschiedenen Wellenlängen im ultravioletten, infraroten oder sichtbaren Lichtspektrum. Am häufigsten wird der Wellenlängenbereich des infraroten Lichts von 850 bis 1000 μm genutzt. Die verwendeten Laserdioden haben eine hohe Leistung. Sie sind dennoch nicht gesundheitsgefährdend, da die Laserimpulse nur etwa 4 bis 30 ns lang sind und somit nur kurzzeitig auf eine Stelle einwirken. [1 (Kap. 18.1)]

Auch die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit zu einem Objekt ist unter Nutzung des Dopplereffekts möglich. Dies wird jedoch aufgrund größeren Aufwandes und höherer Kosten oft nicht genutzt. Stattdessen

wird die Ermittlung der Relativgeschwindigkeit meist über das *Tracking* der Objekte realisiert. [1 (Kap. 18.1)]

3.1.2 Genauigkeit und Störungen

Die Genauigkeit eines Laserscanners hängt vor allem von zwei Dingen ab. Der Abtastwinkel und die Anzahl der Abtastebenen sind systemspezifische Größen des eingesetzten Laserscanners. Der Abtastwinkel gibt an, alle wie viel Grad eine Messung erfolgt. Je geringer der Winkel zwischen den Messungen, desto höher ist die horizontale Auflösung des Scanners. Erhöht man die Anzahl der Abtastebenen erhöht sich auch die vertikale Auflösung des Scanners. Der andere wichtige Einflussfaktor ist direkt von der Auflösung des Laserscanners abhängig. Je weiter ein Objekt vom Scanner entfernt ist, desto geringer ist die Genauigkeit, mit der das Objekt vermessen werden kann. Prinzipiell ist jedoch eine Messung im Abstand von wenigen Zentimetern bis über 100 m möglich. Der Verschmutzungsgrad und der Alterungszustand der Optik kann diese Reichweite jedoch drastisch reduzieren. [1 (Kap. 18.1)]

Für die Genauigkeit und die Verlässlichkeit der Werte spielt auch der Empfangszweig eine wichtige Rolle. Die Sensorik muss eine hohe Empfindlichkeit aufweisen, jedoch auch tolerant gegenüber Fehleinstrahlung sein. Ein Problem stellt dabei die Einstrahlung von Sonnenlicht dar. Das Lichtspektrum der Sonne deckt unter anderem auch den Infrarotbereich ab und hat oftmals eine höhere Einstrahlungsleistung als der reflektierte Laserimpuls. Dies kann zu einer „Blendung“ des Laserscanners führen. Es muss daher über die Optik eine Filterung erfolgen. [1 (Kap. 18.1)]

Auch andere Umgebungsbedingungen können problematisch für die LIDAR-Messung werden. Bei starkem Nebel, Regen oder Schneefall werden die Laserimpulse teilweise an den Tropfen oder Kristallen reflektiert. Die Echos, die dadurch entstehen, sind zeitlich sehr verschieden und können durch *Tracking* (siehe Abschnitt 3.1.3) über mehrere Zyklen eliminiert werden. Dennoch kommt es zu einer starken Dämpfung und somit zu einer Reduzierung der Reichweite. [1 (Kap. 18.1)]

Bei der Lasermessung können weitere Schwierigkeiten auftreten. Die meisten Oberflächen und Materialien reflektieren nur einen Teil des Lichts zurück zum Scanner. Ein Großteil wird durch Diffusion zerstreut oder wird von der Oberfläche adsorbiert. Auf besonders glatten Flächen oder bei

sehr flachen Einfallswinkeln kann die Diffusionsrate so gering sein, dass nicht genügend Licht zum Scanner zurückgeworfen wird, da das Licht durch Totalreflexion in eine andere Richtung geleitet wird. [1 (Kap. 18.1)] Ein weiteres Problem ist es, wenn Materialien ohne große Rückstreuung durchdrungen werden. Glas zum Beispiel hat bei relativ senkrechten Einfallswinkeln des Laserimpulses eine sehr hohe Transmissionsrate, sodass die Glasfläche selbst nur wenig reflektiert und nur dahinterliegende Objekte erkannt werden.

3.1.3 Interpretation der Daten

Zum schwierigsten Teil bei der LIDAR-Messung gehört die Interpretation der gewonnenen Abstandsinformationen. Dazu werden die Daten in mehreren Schritten aufbereitet. Die Gesamtheit aller Schritte stellt das sogenannte *Tracking* dar. Da diese Berechnungen sehr aufwendig sind, wird der Bereich für das *Tracking* zum Teil nur auf bestimmte als relevant deklarierte Bereiche angewandt.

Die für die Diplomarbeit genutzt Laserdatenerkennung wurde in vorangegangenen Projekten und Diplomarbeiten erstellt. Die Interpretation der Rohdaten erfolgt in diesem Fall in vier Schritten. Am Anfang steht die Segmentierung. Es wird dabei versucht Datenpunkte, die eine räumliche Nähe zueinander haben, zusammenzufassen. Um Fehler zu minimieren werden Gruppen mit zu wenigen Punkten oder nur Punkten in einer Scanebene ausgeschlossen. Aus den Punktgruppen wird versucht ein Rechteck zu bilden. Dieses wird über den Mittelpunkt sowie Breite, Länge und Ausrichtungswinkel beschrieben.

Es folgt die Assoziation der Daten mit Objekten aus dem letzten Scanzyklus. Dies ermöglicht den dritten Schritt, die Objektverfolgung. In der Objektverfolgung werden die durch die Assoziation verknüpften Daten aufgearbeitet. Dabei wird beispielsweise ein Kalman-Filter zur eingesetzt. Über verschiedenen Maßnahmen wird versucht, das erkannte Objekte während der Trackingzeit nicht zerfallen oder ihre Zuordnung verlieren.

Die Objektverfolgung vergibt für alle erkannten Einzelobjekte eine ID und speichert die Werte der Tracking-Box in einer Matrix.

Im Anschluss folgt die Klassifizierung der Objekte. Die je nach Geschwindigkeitsvektor und den Werten der Tracking-Box werden die

Objekte in unterschiedliche Fahrzeugklassen und statische Objekte eingeteilt.

3.2 CAN - Controller Area Network

Ein Bussystem ist ein Datennetz zwischen verschiedenen separaten Netzknoten. Im Gegensatz zur direkten Verkabelung ist es mit Bussystemen möglich, die Anzahl der verwendeten Kabel drastisch zu reduzieren und eine Kommunikation zwischen vielen Komponenten zu realisieren. Innerhalb von Fahrzeugen kommunizieren vor allem verschiedenste Steuergeräte untereinander. In der Fahrzeugindustrie ist der CAN-Bus einer der am häufigsten genutzten Bussysteme. Der CAN-Bus erreicht Übertragungsraten von bis zu 1 Mbit/s und ist gegenüber anderen Bussystemen kostengünstig realisierbar. [9 (Kap. 2)]

Der CAN-Bus zählt zu den Linien-Bussystemen, was bedeutet, dass jeder Netzknoten innerhalb des Bussystems mit den anderen verbunden ist. Er ist nach dem Multimaster-Prinzip aufgebaut. Dies bedeutet, dass es kein zentrales Steuergerät gibt, welches die Kommunikation regelt, sondern, dass alle Steuergeräte gleichberechtigt auf den CAN zugreifen können. Der CAN-Bus lässt sich in zwei verschiedene Arten unterteilen. Zum einen gibt es den *Low-Speed CAN* und zum anderen den *High-Speed CAN*. [9 (Kap. 2); 10 (Kap. 3.1)]

3.2.1 Low-Speed CAN

Der *Low-Speed CAN* funktioniert nach dem Einleiterprinzip. Er besitzt nur eine Leitung für das *CAN-High-Signal*. *CAN-Low* wird über die Masse des Fahrzeuges realisiert. Es wird also die Spannung des Busses gegen Masse ausgewertet. Abbildung 3.1 zeigt den physikalischen Aufbau.

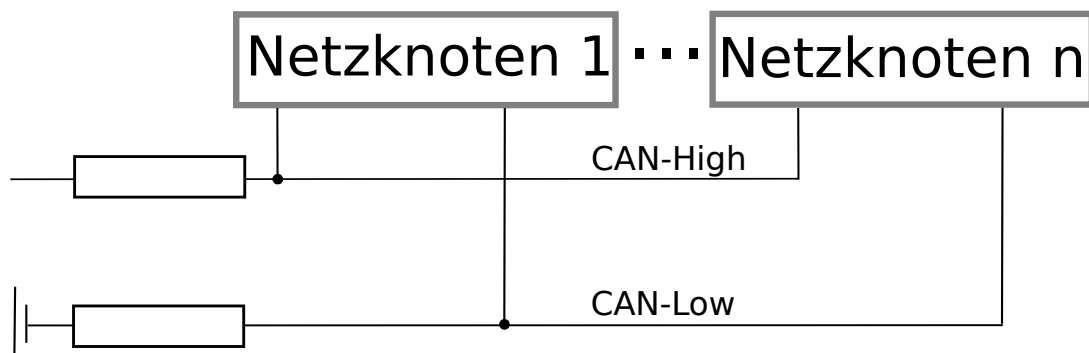


Abbildung 3.1: physikalischer Aufbau Low-Speed CAN

In der folgenden Abbildung 3.2 wird der Signalpegel auf dem Bus gezeigt.

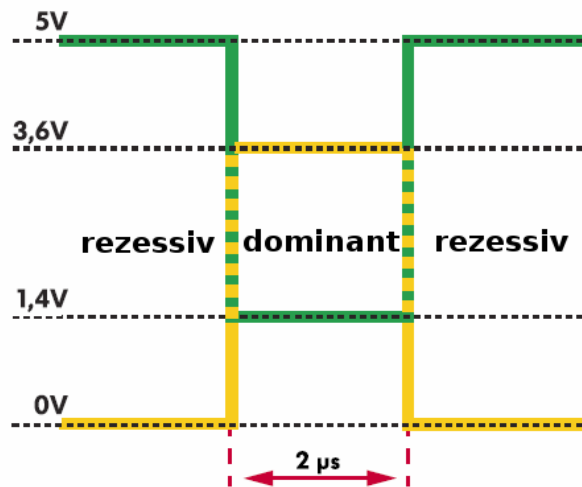


Abbildung 3.2: Signalpegel Low-Speed CAN

[9 (Quelle: VW)]

Ist der Bus frei, liegen an *CAN-High* 5 V an und *CAN-Low* liegt bei 0 V. Dieser Zustand ist rezessiv und entspricht logisch 1. Wird eine logische 0 gesendet, sinkt der Spannungspegel von *CAN-High* auf ca. 1,4 V und *CAN-Low* steigt auf 3,6V. [9 (Kap. 2); 11 (Kap. 2.5)]

Nachteil des *Low-Speed CAN* ist, dass er gegenüber dem *High-Speed CAN* nur mit maximal 125 kBit/s übertragen kann. Außerdem ist er aufgrund der Einleitertechnik anfällig für Störeinflüsse und kann mit maximal 20 Netzknoten betrieben werden. Er ist jedoch noch günstiger als der *High-Speed CAN*. [9 (Kap. 2)]

3.2.2 High-Speed CAN

Der *High-Speed CAN* hat eine Datenrate von 125 kBit/s bis 1 Mbit/s und ist damit deutlich leistungsfähiger als der *Low-Speed CAN*. Auch Störeinflüsse werden durch die verwendete Zwei-Leiter-Technik kompensiert. Der Aufbau des *High-Speed CAN* ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

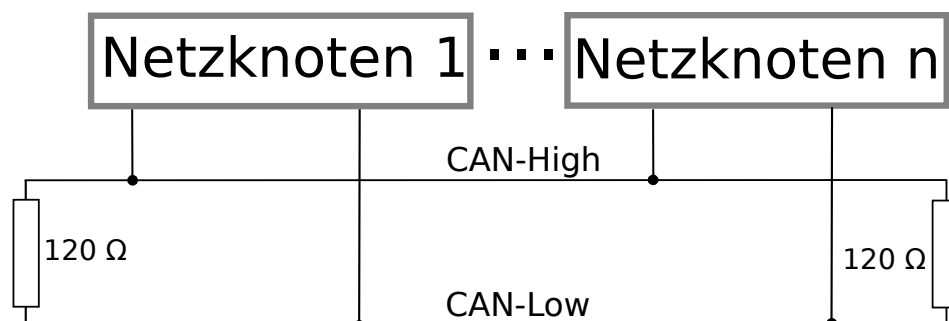


Abbildung 3.3: physikalischer Aufbau High-Speed CAN

Die Leitungen für *CAN-Low* und *CAN-High* sind über einen Abschlusswiderstand von $120\ \Omega$ verbunden. Beide Leitungen sind parallel verlegt, sodass sich Störungen auf beide Signalpegel gleichmäßig auswirken. Dies zeigt auch das Pegelschaubild (Abbildung 3.4). [9 (Kap. 2)]

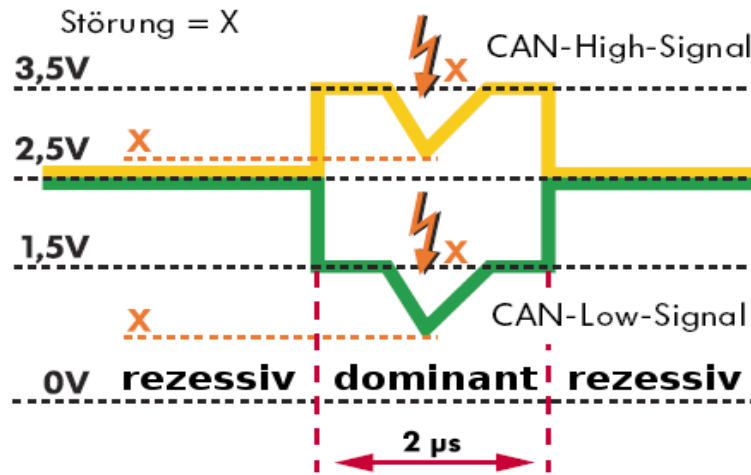


Abbildung 3.4: Signalpegel High-Speed CAN [9 (Quelle: VW)]

Der Ruhepegel beider Leitungen liegt bei 2,5 V. Die Differenzspannung beträgt somit 0 V, was einer rezessiven logischen 1 entspricht. Im dominanten Zustand steigt die Spannung von *CAN-High* auf 3,5 V und die von *CAN-Low* sinkt auf 1,5 V. Die Differenzspannung beträgt somit 2 V. Auch wenn durch Störeinflüsse (x) die Spannung steigt oder sinkt, bleibt die Differenzspannung bei 2 V, da beide Leitungen gleichmäßig betroffen sind. [9 (Kap. 2)]

3.2.3 Aufbau der Botschaften

Die Daten werden im CAN-Bus als Bitfolge gesendet. Sie werden jedoch innerhalb eines *Frames* integriert, welcher Zusatzinformationen enthält.

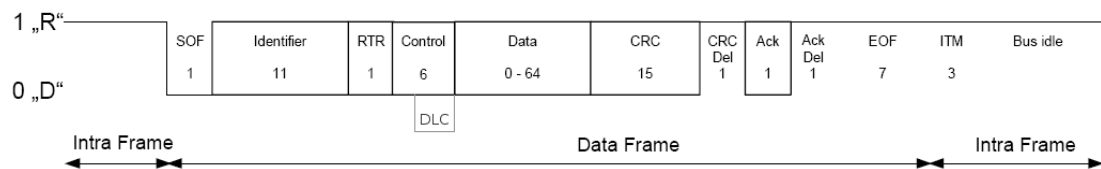


Abbildung 3.5: Aufbau CAN-Botschaft [11 (Quelle: Bolle)]

Abbildung 3.5 zeigt den Aufbau einer CAN-Botschaft. Vor dem Datenfeld ist der Bus im Ruhezustand. Der Versand von Daten startet mit dem ersten dominanten Bit, dem *Start of Frame* (SOF). Gefolgt wird er von elf Bit, in denen die ID der Botschaft hinterlegt ist. Es gibt weiterhin eine Variante mit einem erweiterten ID-Bereich mit 29 Bit. Die ID ist für Kollisionsvermeidung, wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, notwendig. Es folgt

ein Bit für den *Remote Transmission Request* (RTR). Der Bit-Wert gibt an, ob es sich um einen Datenrahmen oder Anforderungsrahmen handelt. Der darauffolgende sechs Bit lange *Control*-Bereich besteht aus zwei reservierten Bit und dem *Data Length Code* (DLC). Dieser belegt die letzten vier Bit des *Control*-Bereichs. Der DLC gibt an, wie viele Bytes das Datenfeld lang ist. Maximal kann das Datenfeld acht Byte, also 64 Bit lang sein. Innerhalb dieses Feldes werden alle zu übertragene Daten hinterlegt. Um die Daten auslesen zu können, muss bekannt sein, mit welchem Bit ein Signal beginnt, der sogenannte Startbit und wie viele Bit dieses lang ist. Im Anschluss folgt eine 15 Bit lange Prüfsumme (*Cyclic Redundancy Check* - CRC). Diese gibt Aufschluss darüber, ob die Daten korrekt übertragen worden. Dieses Feld wird durch ein rezessives Bit abgerenzt (CRC Del.). Das anschließende *Acknowledgment* Feld (ACK) wird vom Sender rezessiv belassen und von den Empfängern dominant überlagert, wenn er die Daten korrekt erhalten hat. Daran schließt ein rezessive Bit zum Abschließen des ACK Feldes an. Es folgt der *End of Frame* (EOF), welcher mit sieben rezessiven Bit das Ende der Botschaft zeigt. Bis die nächste Botschaft gesendet wird, werden drei weitere rezessive Bit, das sogenannte *Intertransmission Field* (ITM) gesendet. [10 (Kap. 3.1)]

Auf dem Bus selbst kann der Frame jedoch länger sein als hier aufgezeigt. Dies kommt durch das *Bit-Stuffing* zustande. Beim *Bit-Stuffing* wird immer dann ein komplementäres Bit eingefügt, wenn fünf gleiche Bit aufeinander folgen. Bei einer Folge von fünf logischen 0 wird somit eine logische 1 eingeschoben und umgekehrt (siehe Abbildung 3.6). Die zusätzlichen Bit werden empfängerseitig einfach wieder entfernt. Das *Bit-Stuffing* wird eingesetzt, da bei längeren Folgen gleicher Bit die Taktrückgewinnung nicht mehr funktioniert und es daher zu Asynchronität zwischen Sender und Empfänger kommen kann. Das *Bit-Stuffing* wird nur vom *Start of Frame* bis zum Ende des CRC-Feldes betrieben. [9 (Kap. 2)]

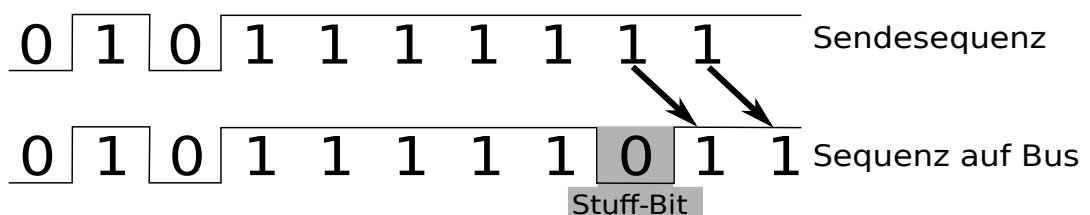


Abbildung 3.6: Bit-Stuffing Beispiel

3.2.4 Kollisionsvermeidung

Der CAN-Bus nutzt ein stochastisches Zugriffsverfahren. Somit können alle angebenen Steuergeräte zu beliebiger Zeit senden. Um Kollisionen zu verhindern, wird über die Arbitrierung geregelt, welches Steuergerät letztlich seine Datenpakete senden darf. Wie bereits erwähnt, hängt die Priorisierung eines Senders von dessen ID ab. Je niedriger die ID, desto höher die Priorität. Das folgende Beispiel zeigt die Arbitrierung bei drei gleichzeitig sendenden Netzknoten. [9 (Kap. 2)]

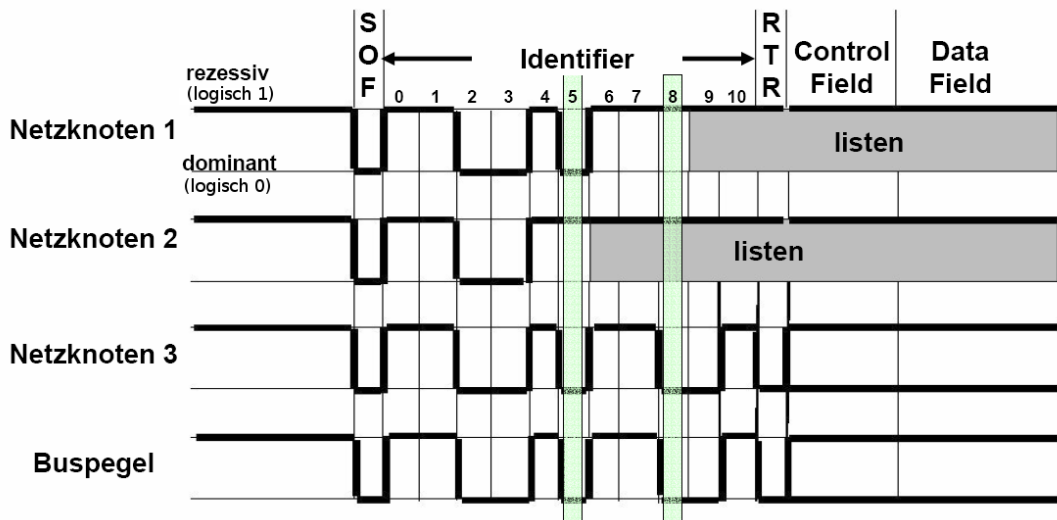


Abbildung 3.7: Arbitrierung Beispiel [9 (Quelle: Nosper)]

Alle Netzknoten fangen gleichzeitig an zu senden. Bei Bit 5 im ID Feld zieht sich Netzknoten 2 vom Sendevorgang zurück, da er ein rezessives Bit sendet, während die anderen beiden Netzknoten ein dominantes Bit senden. Netzknoten 2 „hört“ somit nur noch zu. Das gleiche ist der Fall für Knoten 1, welcher sich bei Bit 8 zurückzieht. Netzknoten 3 ist der letzte verbleibende Sender und kann seine Botschaft übermitteln. Aus den Bit des ID Felds lässt sich die ID rekonstruieren. Dabei wird vom letzten Bit 10 ausgehend bis zum Bit 0 gerechnet. Die Bit repräsentieren dabei ein binäres Polynom von 2^0 bis 2^{10} . [9 (Kap. 2)]

$$\begin{array}{cccccccccc}
 \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{1} \\
 2^{10} & 2^9 & 2^8 & 2^7 & 2^6 & 2^5 & 2^4 & 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0 \\
 \mathbf{ID:} & 2^{10} & +2^9 & +2^6 & +2^4 & +2^3 & +2^0 & =1625
 \end{array}$$

Abbildung 3.8: Berechnung ID Netzknoten 3

Für Netzknoten 1 ergibt sich, äquivalent zur Berechnung der ID von Netzknoten 3 in Abbildung 3.8, eine ID von 1631 und für Netzknoten 2

eine ID von 1663. Die Netzknoten, welche sich zurückgezogen haben, werden versuchen, die Botschaft erneut zu senden, wenn der Bus wieder frei ist. Für das Beispiel ergibt sich somit eine Sendereihenfolge von Netzknoten $3 > 1 > 2$. [9 (Kap. 2)]

3.2.5 Prüfsumme (CRC)

Die Prüfsumme wird im Sender erzeugt. Dazu ist ein Generatorpolynom notwendig. Ein solches Generatorpolynom zeigt das folgende Beispiel. $x^3+x^1+x^0=1011$. Das Generatorpolynom ist entsprechend der Anzahl seiner Stellen ein Polynom 4. Ranges (r). Ein Rechenbeispiel zur Berechnung der Prüfsumme mittels Polynomdivision findet sich in Abbildung 3.9. [9 (Kap. 2)]

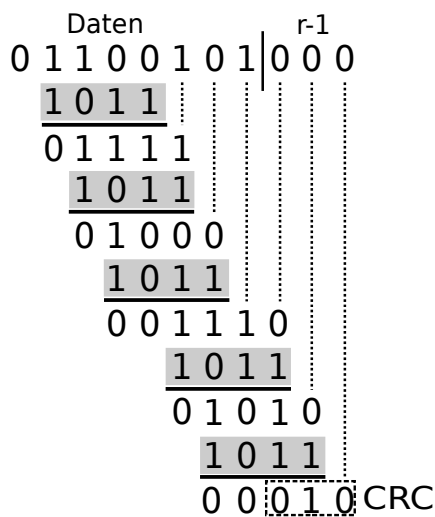


Abbildung 3.9: Beispiel Berechnung der Prüfsumme

Den Daten-Bit werden $r-1$ Nullen angehängt. Anschließend wird ab der ersten gemeinsamen 1 über XOR mit dem Generatorpolynom (grau hinterlegt) verknüpft. Dies wird wiederholt, bis alle Bit verwendet wurden. Die Prüfsumme CRC bildet schließlich die letzten $r-1$ Stellen des berechneten Wertes (gestrichelt umrandet). Zum Versenden wird schließlich den ursprünglichen Daten der CRC-Bittring angefügt. In diesem Beispiel würde sich daher ein *Bittring* von $01100101|010$ ergeben. [9 (Kap. 2)]

Auf der Empfängerseite wird der gesamte *Bittring* des Datenfeldes und des CRC-Anhang erneut wie oben mittels XOR mit dem Generatorpolynom verknüpft. Wurden alle Daten korrekt übertragen, ist der sich ergebende Rest $=0$. Gibt es Fehler, wird der Rest $\neq 0$. Der Empfänger sendet dann einen *Error Flag* und markiert damit die Nachricht als fehlerhaft. [9 (Kap. 2)]

3.3 Globales Navigationssatellitensystem

Unter einem Globalen Navigationssatellitensystem, kurz GNSS, versteht man ein Netzwerk aus speziellen Satelliten, die genutzt werden können, um die eigene Position auf der Erde zu bestimmen. Ein Abriss der histori-

schen Entwicklung von Satelliten-Navigations-Systemen kann Anlage 3.1 entnommen werden.

3.3.1 Funktionsprinzip

Die Positionsbestimmung mittels Satelliten basiert auf dem Prinzip der Funkortung. Für die Funkortung gibt es verschiedenste Verfahren. So zum Beispiel die Entfernungsmessung, das Hyperbelschnittverfahren, das Dopplerverfahren oder das Rho-Theta-Verfahren. [12 (Kap. 2)]

Für die Satellitenortung ist dabei hauptsächlich die Einweg-Entfernungsmessung (One Way Ranging) von Bedeutung. Dabei wird von Stationen, beispielsweise Satelliten, ein Signal ausgesendet. Dieses Signal enthält codiert die Ephemeriden (Bahnparameter) des Satelliten sowie einen hochpräzisen Zeitstempel. Nach einer bestimmten Zeit erreicht das Signal den Empfänger. Diese Signallaufzeit kann man mit der Lichtgeschwindigkeit multiplizieren und erhält damit die Entfernung zum Sender. Das ist möglich, da sich elektromagnetische Wellen in Luft mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Damit entsteht eine Entfernungskugel um den Sender. Mit der Erde als weitere Sphäre ergibt sich als Schnittfigur ein Entfernungskreis auf deren Oberfläche. Mit lediglich einem Sender ist eine Positionsbestimmung ohne weitere Informationen nicht möglich. Der Empfänger wüsste lediglich, dass er sich auf einem bestimmten Umkreis um den Sender befindet. (siehe Anlage 3.2 Abbildung a). Unter gewissen Umständen, nämlich wenn der Streckenverlauf und die Höhe bekannt sind, wäre eine Ortung zum Teil dennoch möglich.[12 (Kap. 2); 13 (Kap. 1.1)]

Bei zwei Sendern ergeben sich auch zwei Entfernungskreise, die sich auf der Erde schneiden. Es werden dabei fast immer zwei Schnittpunkte entstehen. Dies ist nur dann nicht der Fall, wenn sich der Empfänger exakt auf einer Linie zwischen den Sendern befindet. Der Empfänger kann sich somit im Normalfall nur an zwei verschiedenen Punkten befinden. Dies wird in Anlage 3.2 Abbildung b veranschaulicht. Auch hier ist eine weitere Informationsquelle, zum Beispiel die Höhe oder ähnliches notwendig, um die Position auf einen der Schnittpunkte eingrenzen zu können. So kann sich beispielsweise ein Schiff nicht an einem Punkt befinden, der auf dem Land liegt. Dies stellt jedoch den Idealfall dar, bei dem alle Uhren zeitsynchron und mit ausreichender Präzision laufen. Die Satelliten selbst

haben eine sehr gute Zeitgenauigkeit, da in ihnen hochpräzise Atomuhren laufen. Eine solch genaue Zeitmessung ist jedoch für normale Empfänger nicht möglich. Da die Zeit nicht exakt bestimmt werden kann, ergeben sich sogenannte Pseudolaufzeiten und daraus resultierend Pseudoentfernungen. Diese bilden lediglich ein Verhältnis der Entfernung zwischen beiden Satelliten ab, sodass eine Hyperbel entsteht, auf der sich der Empfänger befinden könnte. [12 (Kap. 2); 13 (Kap. 1.1)]

Kommt ein dritter Sender hinzu, ist es möglich eine eindeutige Position zu bestimmen, da sich die Kugelflächen der Entfernungskugeln in einem Punkt auf der Erde schneiden. Visualisiert ist dies in Anlage 3.2 Abbildung c. Wird die Erde und somit die Höhe des Standortes nicht als Referenzsphäre genutzt, entstehen theoretisch bei drei Satelliten zwei Kugelschnittpunkte. [12 (Kap. 2); 13 (Kap. 1.1)]

Zur Bestimmung der Koordinaten im Raum sind daher mindestens vier Satelliten notwendig. Durch den vierten Satelliten wird es auch möglich den Zeitfehler des Empfängers zu bestimmen. Aus der Triangulation wird somit eine Quadrangulation. [12 (Kap. 2)]

Jeder weitere Sender im Empfangsbereich des zu ortenden Gerätes führt zu einer Genauigkeitssteigerung. Grund dafür ist, dass Fehlinformationen einzelner Satelliten erkannt und herausgerechnet werden können. So kann beispielsweise der Fehler durch *Multi Path Effects* (siehe Kapitel 3.3.4) verringert werden. Neben der Verbesserung der Genauigkeit ist jedoch auch die Steigerung der Verfügbarkeit von ausreichend Satelliten ein wichtiger Effekt. Dadurch kann auch bei kurzzeitiger Abschattung einzelner Satelliten noch eine korrekte Ortung erfolgen. Dies ist vor allem im urbanen Bereich mit hoher Bebauung und in sonstigen Umgebungen mit eingeschränkter Sicht auf den Horizont, wie in Gebirgen, wichtig. [12 (Kap. 2)]

Für ein globales System werden daher eine Vielzahl von Satelliten benötigt, um sicherzustellen, dass immer eine ausreichende Anzahl im Sichtbereich des Empfängers ist.

3.3.2 Assisted GPS (A-GPS)

Die von den Satelliten übertragenen Ephemeriden und Satellitenkonstellationen werden als Almanach bezeichnet. Sie werden im Empfänger zwischengespeichert, um nach einer Zeit im ausgeschalteten Zustand oder

nach einem Empfangsverlust schnell wieder eine Ortung zur ermöglichen. Einen Start der Ortung mit diesen vorhandenen Daten nennt man *Hot Start*. Der Almanach ist jedoch lokal begrenzt und auch nur für eine bestimmte Zeit gültig. Ist die Empfangsstation also längere Zeit nicht aktiv oder legt im deaktivierten Zustand eine größere Strecke zurück, ist der Almanach nur teilweise oder nicht mehr verwendbar. In diesem Fall muss der Empfänger einen *Cold Start* durchführen. Je nach Ausschalt-dauer und Positionsänderungen kann die Akquisition des Almanachs über die Satelliten bis zu 12,5 Minuten dauern [13 (Kap. 3.4)]. Bei schlechtem Empfang, zum Beispiel zwischen hohen Gebäuden, kann es unter Umständen sogar gar nicht möglich sein, die Position aus dem *Cold Start* heraus zu bestimmen. [13 (Kap. 3.4); 12 (Kap. 8.11)]

Abhilfe schaffen Systeme, die weitere Informationsquellen einbeziehen. Das A-GPS nutzt dabei zusätzliche schneller Funkverbindungen, um den Almanach für die aktuelle Zeit und die grobe Position zu erhalten. Die ungefähre Ortung und Übertragung dieser Daten lässt sich beispielsweise über das GSM-Netz (Global Systems for Mobile Communications) oder über WLAN realisieren. Damit wird es möglich, die Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung, dem *First Fix*, deutlich zu reduzieren. Ähnlich wie beim *Hot Start* liegt die Zeit bis zum *First Fix* dann bei wenigen Sekunden. [13 (Kap. 3.4); 12 (Kap. 8.11)]

Zu A-GPS zählt jedoch auch die Verbesserung der Ortung über Zusatz-dienste. Das sogenannte *differenzielle GPS*, kurz D-GPS nutzt eine Vielzahl von Bodenstationen, deren genauer Standort bekannt ist, um Störungen (Abschnitt 3.3.4) heraus zu rechnen und somit die Genauigkeit zu steigern. Diese Technik wird vor allem von Vermessungsdiensten genutzt. In Deutschland wird der Dienst SAPOS angeboten. Dieser hat etwa 270 Referenzstationen in ganz Deutschland. [13 (Kap. 3.4)]

Mittels D-GPS ist es möglich, die Position auf 0,3 bis 2,5 m genau zu bestimmen. Die Genauigkeit lässt sich indes weiter steigern, wenn die Trägerwelle des Satellitensignals genauer vermessen und eine Mittelung der Position durchgeführt wird. Damit sind letztlich mittlere Positionsabweichungen von unter einem Zentimeter möglich. Diese Genauigkeit ist jedoch im Fahrzeugbereich nicht erreichbar, da eine Mittlung nur im stationären Zustand durchgeführt werden kann. [13 (Kap. 3.4)]

3.3.3 Frequenzen und Orbits

Damit sich die vielen verschiedenen Dienste, die Funkübertragung nutzen, nicht gegenseitig stören, gibt es eine Institution, welche für die Verteilung der Funkfrequenzen zuständig ist. Die International Telecommunication Union, kurz ITU, hat den verschiedenen GNSS-Systemen bestimmte Frequenzbänder zugewiesen. Eine Übersicht über die verwendeten und reservierten Frequenzbänder für die drei wichtigsten Systeme GPS, Galileo und GLONASS sind in Abbildung 3.10 zu sehen.

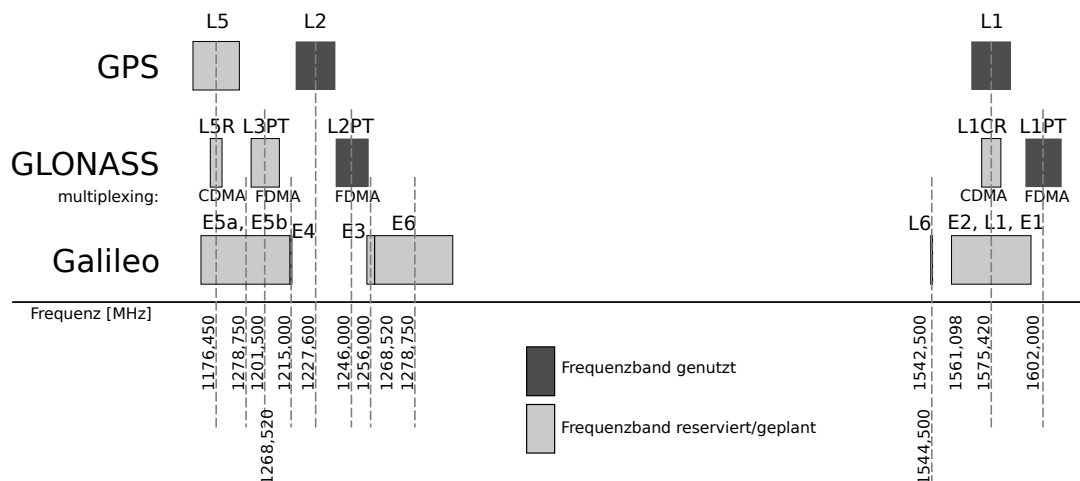


Abbildung 3.10: Frequenzbänder für GNSS (Stand 2008) [14]

Die ITU hat für das Frequenzband von 1 bis 2 GHz die Bezeichnung L-Band festgelegt [15]. Im Zusammenhang mit den GNSS-Frequenzen werden diese in das untere L-Band (um 1,2 GHz) und das obere L-Band (um 1,5 bis 1,6 GHz) eingeteilt.

In der Erdumlaufbahn gibt es verschiedene Orbits, die sich im Abstand zur Erde und der damit verbundenen Umlaufgeschwindigkeit und -zeit unterscheiden. Die Hauptsatelliten aller GNSS-Systeme befinden sich auf ähnlichen Orbits. Sie besitzen durchschnittlich eine Umlaufzeit von 12 Stunden. Die Satelliten von Galileo haben mit etwa 14 Stunden die größte Umlaufzeit und die von GLONASS mit circa 11 Stunden die kleinste. Teilweise haben die GNSS-Systeme außerdem einige wenige Satelliten auf dem sogenannten geostationären Orbit. Objekte auf diesem Orbit haben die gleiche Winkelgeschwindigkeit, wie die Erde. Das heißt, dass sie wie die Erde 24 Stunden für einen „Umlauf“ brauchen. Daraus folgt, dass sich diese Objekte ortsfest über einem Punkt auf der Erde befinden.

Eine Veranschaulichung der verschiedenen Orbits ist in Abbildung 3.11 zu sehen. Darin sind außerdem das Weltraumteleskop Hubble sowie die

Internationale Raumstation (ISS - International Space Station) als Vergleichsobjekte eingezeichnet.

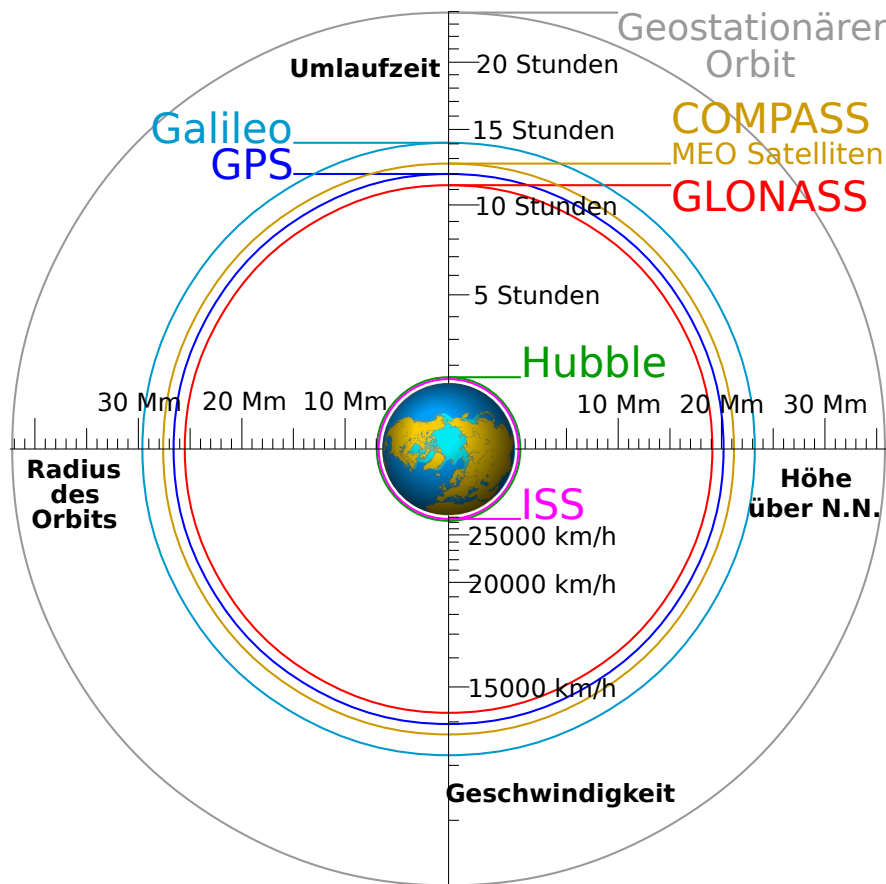


Abbildung 3.11: Orbits verschiedener GNSS-Systeme und Vergleichsobjekte [16]

Auch die Verteilung der Satelliten auf verschiedene Flugbahnen um die Erde ist wichtig. Die Bahnen müssen sich mit einem möglichst orthogona-len Winkel schneiden. Auch sollte immer ein Mindestabstand zwischen den Satelliten eingehalten werden, um gegenseitige Störungen zu verhindern.

3.3.4 Genauigkeit und Störeinflüsse

Für GNSS-Systeme gibt es aufgrund der hohen Distanz, die das Signal zurücklegen muss, relativ viele Störmöglichkeiten. Auf dem Signalweg können Störungen in der Atmosphäre das Signal beeinflussen, aber auch die Umgebung und die Güte des Empfängers sowie Fremdeinflüsse spielen eine Rolle.

Abschattung

Die Abschattung oder auch *Masking* genannt, ist eine wichtige Störgröße. Sie tritt auf, wenn der direkte Signalpfad zum Satelliten durch Objekte unterbrochen wird. Der Satellit ist daher für den Empfänger nicht

mehr sichtbar. Ein gutes Beispiel sind hohe Häuserschluchten und steile Felswände, aber auch Tunnel und Innenräume von Gebäuden. Die Abschattung beeinflusst maßgeblich die Verfügbarkeit der Satelliten. Neben der Verfügbarkeit von ausreichend Satelliten verringert sich mit abnehmender Zahl sichtbarer Satelliten auch die Positionsgenauigkeit, da sich unter anderem die DOP (Dilution of Precision) verschlechtern wird. Anstelle einer vollständigen Abschattung kann es zum Beispiel durch Bäume auch nur zu einer starken Dämpfung des Signals kommen. Je nach Empfindlichkeit des Empfangsgerätes kann dies ebenfalls zu Signalabbrüchen führen. [12 (Kap. 5.4)]

DOP - Dillution of Precision

Dillution of Precision, zu Deutsch „Verringerung der Genauigkeit“, ist eine Größe, die etwas über die Güte der Satellitenpositionen aussagt.

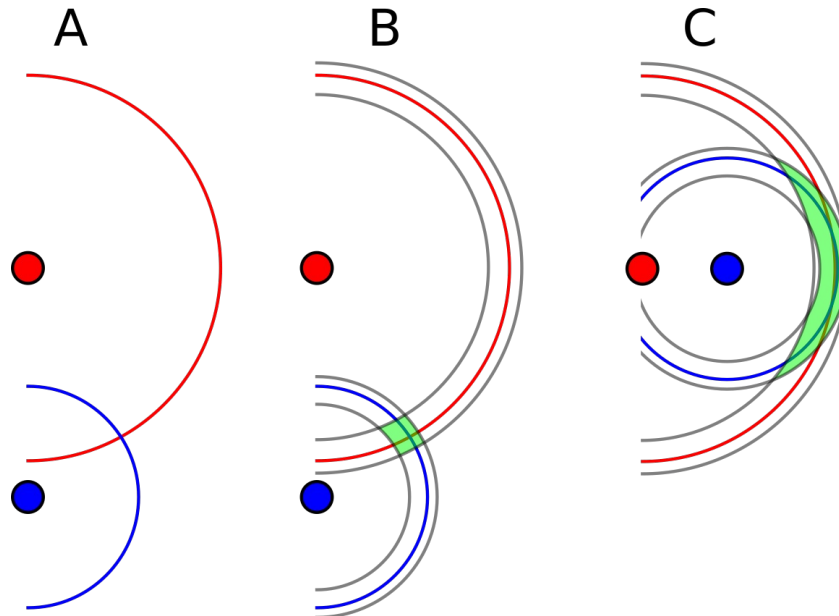


Abbildung 3.12: Grundlage Dillution of Precision (DOP) [17]

Wären die Signallaufzeiten ideal, gäbe es diesen Einflussfaktor nicht, da sich die Entfernungskugeln immer in punktförmig schneiden würden (siehe Abbildung 3.12 A). Da dies jedoch nicht der Fall ist, gibt es immer einen Fehlerbereich. Je nach Position der Satelliten ist es dabei möglich, dass dieser Bereich kleiner oder größer ist. Darstellung B zeigt eine Konstellation mit geringem DOP-Wert und damit einhergehend hoher Messgenauigkeit. Die Konstellation in Darstellung C hingegen hat einen hohen DOP-Wert, da die Fläche der sich überlappenden Fehlerbereiche deutlich größer ist. Je orthogonaler sich die Entfernungskugeln schneiden, desto geringer ist der DOP-Wert und damit die Messunsicherheit. Im dreidimensionalen Raum spannen die Satelliten die Standfläche einer umgedrehten Pyramide auf, an deren Spitze sich der Empfänger befindet. Je größer das Volumen dieser Pyramide, desto geringer der DOP-Wert und somit der Messfehler. Dies wird in Abbildung 6.6 verdeutlicht, wobei a) einen hohen DOP und b) einen niedrigen DOP darstellt. [12 (Kap. 4.4/4.5); 13 (Kap. 3.3.3)]

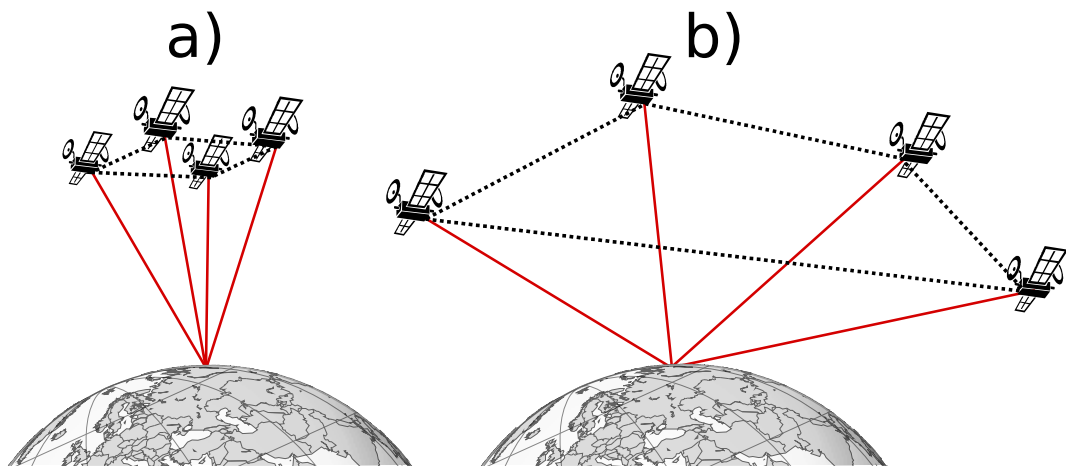


Abbildung 3.13: DOP Pyramide [18; 19]

Es gibt verschiedene DOP-Werte, so zum Beispiel für die horizontale Güte (HDOP–Horizontal DOP) und für die vertikale Güte (VDOP–Vertical DOP). Aus diesen beiden resultiert die Positionsgüte (PDOP–Position DOP). Mit der Zeitungenauigkeit (TDOP–Time DOP) ergibt sich daraus die geometrische Güte (GDOP–Geometric DOP). [12 (Kap. 4.4/4.5); 13 (Kap. 3.3.3)]

Atmosphärische Einflüsse

Die Größe des Fehlerbereichs für ein Signal wird maßgeblich durch die Verfälschung der Signallaufzeit beeinflusst. Eine wichtige Rolle spielen dabei atmosphärische Störgrößen. Die größten Veränderungen der Signallaufzeit werden durch die Ionosphäre verursacht. Sie umhüllt die Erde in etwa 60 bis 1000 km Höhe. Innerhalb der Ionosphäre werden die elektromagnetischen Wellen des Satellitensignals gebrochen. Sie legen daher keine geradlinige Strecke zurück und die Laufzeit erhöht sich (siehe Abbildung 3.14). [13 (Kap. 3.3.2)]

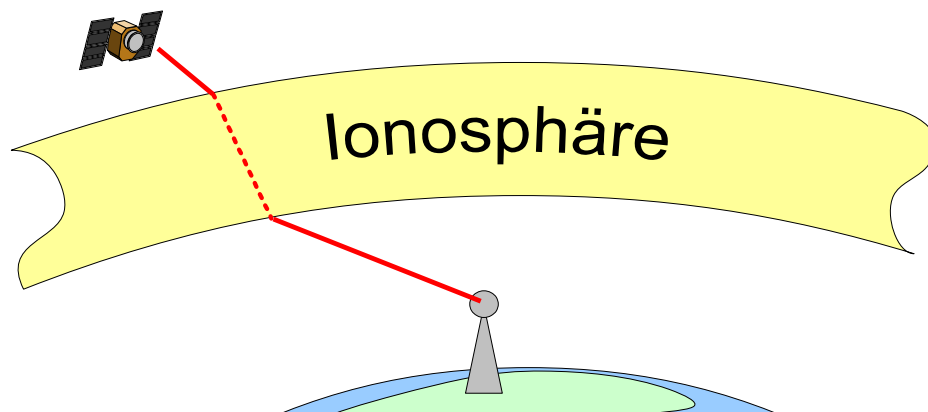


Abbildung 3.14: Laufzeitverzögerung durch Brechung [20]

Zum Teil lässt sich dieser Störeffekt herausrechnen, wenn der genaue Zustand der Ionosphäre bekannt ist. Die Informationen dafür werden

vom EGNOS-Satelliten per sogenannten P-Code an den Empfänger übermittelt. Der Zustand der Ionosphäre ist vor allem an die Sonnenaktivität gebunden. Die Brechung des Signals ist frequenzabhängig. Daher werden verschiedene Frequenzbänder genutzt, um den Effekt teilweise zu kompensieren (siehe Abschnitt 3.3.3). Die Troposphäre hat aufgrund ihrer geringen Dicke von etwa 15 km nur bei niedrigem Evaluationswinkel der Satelliten einen merklichen Einfluss auf die Signallaufzeit. Innerhalb der Troposphäre kommt es jedoch zu einer stärkeren Dämpfung des Signals. Dies ist bei Regen oder Schneefall besonders ausgeprägt. [12 (Kap. 6.3.2); 13 (Kap. 3.3.2)]

Mehrpfadeffekte

Neben der Abschattung gibt es in stark bebauten Gegenden oder in der Nähe anderer hoher Hindernisse sogenannte Mehrpfadeffekte oder auch Multi Path Effects. Diese entstehen, wenn das Satellitensignal von Objekten reflektiert wird, bevor es den Empfänger erreicht. Durch die Reflexion wird das Mehrwegesignal um 180° phasenverschoben. Dies kann dazu führen, dass sich die Wellen des Mehrwegesignals und des direkten Signals gegenseitig abschwächen oder sogar ganz auslöschen. Außerdem kann es vorkommen, dass das Mehrwegesignal anstatt des direkten Signals für die Positionsberechnung genutzt wird. Dies ist dahingehend problematisch, da das Mehrwegesignal einen größeren Weg zurückgelegt hat und die Positionsbestimmung damit verfälscht wird. Dies kommt beispielsweise vor, wenn das direkte Signal von einem Objekt blockiert wird und damit die Signalstärke des Mehrwegesignals höher ist als die des Direktsignals. Der Positionierungsfehler durch Mehrpfadeffekte lässt sich unter Nutzung der Periodizität des GNSS-Signals im Normalfall auf etwa 5 m reduzieren. [12 (Kap. 5.5); 13 (Kap. 3.3.4)]

Fremdstörquellen

Des Weiteren kann das GNSS-Signal relativ leicht durch andere Signalquellen gestört werden, die eine ähnliche Frequenz nutzen. Aus diesem Grund wird versucht, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, diese Frequenzen freizuhalten. Dies hilft jedoch nicht gegen das vorsätzliche Überlagern dieser Frequenz. Das sogenannte *Jamming* nutzt die Überlagerung um die Ortung zu stören und zu verhindern. Es gibt jedoch technische Möglichkeiten, wie bestimmte Richtantennen, um die Störung zu verhindern.

Eine weitere Variante der Fremdeinwirkung ist das *Spoofing*. Im Gegensatz zum *Jamming* wird nicht versucht, die Ortung zu verhindern, sondern eine falsche Position zu erzeugen. Dies ist unter anderem möglich, indem man das Signal eines Satelliten aufzeichnet und mit einem Zeitversatz wieder aussendet. Maßnahmen gegen diese Art der Manipulation sind nicht trivial. Eine potenzielle Variante ist es, Signale mit auffälligem Signalpegel von der Berechnung auszuschließen. Hilfreich ist auch die Verifizierung der Position über zusätzliche Ortungsdienste oder durch Sensordatenfusion. [12 (Kap. 5.9)]

Genauigkeit

Die Genauigkeit von GPS ohne weitere Hilfsmittel liegt im offenen Gelände bei etwa 10 m. Unter Zuhilfenahme des P-Codes lässt sich die Genauigkeit auf etwa 6 m verbessern. Durch D-GPS sind im nicht dynamischen Bereich auch Genauigkeiten von unter 2 cm möglich. [13 (Kap. 3.3.5)]

Die Genauigkeit kann aufgrund der zahlreichen Störeinflüsse jedoch stark schwanken. Bei sehr schlechten Empfangsbedingungen sind Abweichungen von bis zu 100 m nicht auszuschließen.

3.4 Geodäsie

3.4.1 Gestalt der Erde und Gradnetz

Grob vereinfacht lässt sich die Erde als eine Kugel darstellen. Ihr mittlerer Erdradius liegt bei circa 6371 km. Vergleicht man jedoch den Durchmesser der Nord-Süd-Achse (kleine Halbachse) mit dem Äquatordurchmesser (große Halbachse) wird klar, dass die Erdkugel zu den Polen hin abgeflacht ist. Sie entspricht daher eher einem Ellipsoid. Doch auch dies ist nur eine Vereinfachung der sehr unregelmäßigen Gestalt der Erde. Der Erd-Ellipsoid, oder auch Referenzellipsoid genannt, wird jedoch als Grundlage geodätischer Referenzsysteme genutzt. Eine noch detaillierte Betrachtung der Gestalt der Erde bietet das sogenannte Geoid-Modell.

Das heute meist genutzte Referenzsystem ist das WGS84 (World Geodetic System 1984). Es legt die große Halbachse (Äquatordurchmesser) auf 6378,137 km und die kleine Halbachse (Polarradius) auf 6356,752 km

fest. WGS84 ist auch die Grundlage für Koordinaten des GPS-System. [13 (Kap. 1.2.3)]

Die Position auf der Erde wird in einem sphärischen Koordinatensystem angegeben. Die Erde wird dabei in Längen- und Breitenkreise unterteilt. Die Längengrade umspannen die Erde in Nord-Süd-Richtung. Die halben Längengrade stellen die Meridiane, welche den Längengraden entsprechen dar. In Ost-West-Richtung wird die Erde daher in Längengrade (Longitude) von -180 bis 180° unterteilt. Der heute verwendete Nullmeridian wurde 1984 auf den Nullmeridian in Greenwich nahe London festgelegt. In Richtung Westen werden von dort ausgehend die Längengrade negativ und nach Osten hin positiv. In Nord-Süd-Richtung wird die Erde ausgehend vom Äquator in ± 90 Breitengrade (Latitude) untergliedert. Dabei ist der Nordpol als 90° und der Südpol als -90° definiert. [13 (Kap. 1.2.2)]

Sowohl die Längengrade als auch die Breitengrade sind in Abbildung 3.15 dargestellt.

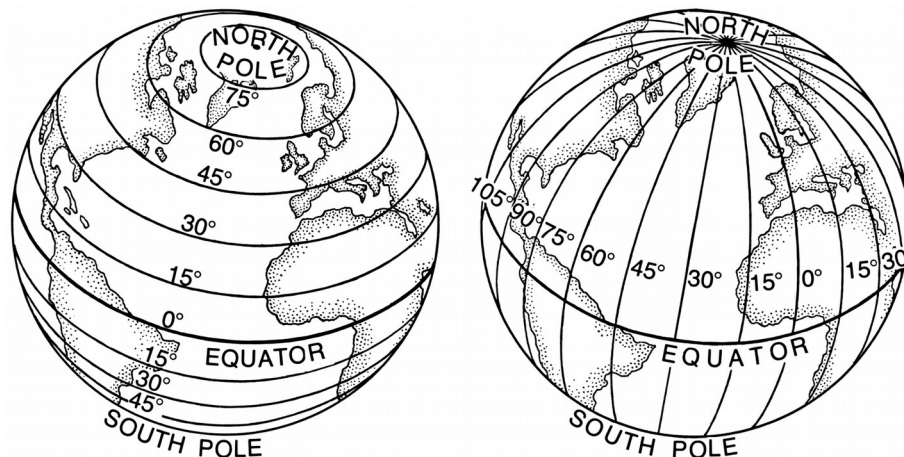


Abbildung 3.15: Breitengrade (links) und Längengrade (rechts) [21; 22]

Längengrade und Breitenkreise unterscheiden sich dabei deutlich. Längengrade sind nicht parallel zueinander, stellen jedoch sogenannte Großkreise dar. Das heißt, dass alle Längengrade ihren Mittelpunkt im Erdmittelpunkt haben und somit den größtmöglichen Umfang besitzen. Die Längengrade laufen zu den Polen hin zusammen, was bedeutet, dass der Abstand von einem Längengrad zum Nächsten, zu den Polen hin abnimmt.

Die Breitengrade hingegen sind parallel zum Äquator. Ihr Abstand variiert nicht. Bis auf den Äquator sind sie daher alle Kleinkreise, deren Umfang sich zu den Polen hin verkleinert, bis sie schließlich bei $\pm 90^\circ$ nur noch als Punkt definiert sind. [23]

3.4.2 Berechnungen

Für die Berechnungen im Rahmen der Diplomarbeit wurden eine etwas vereinfachte Methode genutzt. Dabei wurde nicht mit sphärischer Trigonometrie gearbeitet, sondern die Koordinaten auf ein kartesisches Koordinatensystem umgewandelt. Grund dafür ist, dass dies für kurze Distanzen keinen relevanten Einfluss hat. Die maximale Distanz, die für die Car2X-Kommunikation entscheidend ist, liegt unter einem Kilometer. Die Kommunikationsreichweite zwischen zwei Modulen liegt im offenen Gelände erfahrungsgemäß bei etwa 300 m. Besonders sicherheitskritische Funktionen werden außerdem oft erst aktiv, wenn die Fahrzeuge nur einige Meter voneinander entfernt sind. In diesem Fall ist der Ortungsfehler der Satellitennavigation größer, als die durch die einfache Rechnung verursachte Abweichung.

3.4.3 Abstand zwischen zwei Punkten

Berechnet werden soll der kürzeste Abstand zwischen zwei Punkten, die sogenannte Orthodrome. Das GNSS-System liefert für das eigene Fahrzeug eine Koordinate mit Längenrad(λ) und Breitengrad(Φ). Die Position des anderen Fahrzeuges wird mittels Car2X übertragen. Koordinaten des eigenen Fahrzeuges tragen in den folgenden Formeln den Index „0“ und die des anderen Fahrzeuges den Index „1“. Mit den Koordinaten lässt sich der Abstand der Fahrzeuge in Grad in latitudinaler und longitudinaler Richtung mit den Formeln 3.1 und 3.2 berechnen.

$$d\lambda = \lambda_0 - \lambda_1 \quad (3.1)$$

$$d\Phi = \Phi_0 - \Phi_1 \quad (3.2)$$

Der wie Abschnitt 3.4.1 beschrieben ist der Abstand zwischen allen Breitenkreisen gleich groß. Der Abstand zwischen zwei Breitengraden in Metern ergibt sich somit, wenn man dem halben Erdumfang mit den Breitengraden ($\pm 90^\circ = 180^\circ$) dividiert. Der Erdumfang errechnet sich wie der Umfang einer Kugel mit dem Polarradius (R_{Pol}) von 6.356.752 m. Zusammengefasst ist dies in Formel 3.3.

$$d_{Lat^\circ} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot R_{Pol}) / 2}{180^\circ} = \frac{\pi \cdot 6356752 \text{ m}}{180^\circ} = \underline{\underline{117478,11 \text{ m}}} \quad (3.3)$$

Multipliziert man Formel 3.1 mit der Differenz aus Formel 3.2 ergibt sich Formel 3.4 zur direkten Berechnung des latitudinalen Abstands in Metern.

$$d_{Lat} = (\Phi_0 - \Phi_1) \cdot \frac{\pi \cdot R_{Pol}}{180^\circ} \quad (3.4)$$

Die Berechnung des longitudinalen Abstandes entspricht zu weiten Teilen der des latitudinalen Abstandes. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich der Abstand zwischen zwei Längengraden zu den Polen hin verringert. Dieser Faktor wird über die Multiplikation mit dem Sinus des Breitengrades erreicht. An dieser Stelle tritt eine Vereinfachung ein. Der Korrekturfaktor kann nur für einen Punkt bestimmt werden. Eine Möglichkeit wäre es, die Breitengrade beider Punkte zu mitteln. Damit ergibt sich für kurze Distanzen eine ausreichende Genauigkeit. Für den Abstand in Ost-West-Richtung ergibt sich somit Formel 3.6.

$$d_{Lon} = (\lambda_0 - \lambda_1) \cdot \frac{\pi \cdot R_{Äqu}}{180^\circ} \cdot \cos\left(\frac{\Phi_0 + \Phi_1}{2}\right) \quad (3.5)$$

Mittels Trigonometrie lässt sich der Abstand zum anderen Fahrzeug berechnen.

$$d = \sqrt{(d_{Lon}^2 + d_{Lat}^2)} \quad (3.6)$$

3.4.4 Berechnung des Azimut

Der Azimut stellt den Winkel zur Position des anderen Punktes in Bezug auf den Meridian und daher die Himmelsrichtung dar. Für die Berechnungen wurden die Formel aus dem Lehrbuch „Formelsammlung für Vermessungswesen“ genutzt. Sie bieten den Vorteil, dass ein Winkel von 0 bis 360° entsprechend einer Windrose berechnet werden kann. Dazu muss jedoch zu d_{Lon} und d_{Lat} ein Wert von $1 \cdot 10^{-a}$ hinzu addiert werden. Die Potenz a gib dabei die Stellenanzahl an, mit der gerechnet wird. Dies ist notwendig, da sich sonst in Formel 3.7 eine Nulldivision ergeben könnte. [24 (Kap. 4.1.1)]

$$Az = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \left[\arctan\left(\frac{d_{Lat} + 1 \cdot 10^a}{d_{Lon} + 1 \cdot 10^a}\right) + \pi - [1 - \text{sgn}(d_{Lon})] \cdot \text{sgn}(d_{Lat}) \cdot \frac{\pi}{2} \right] \quad (3.7)$$

4 Systemaufbau und Inbetriebnahme

4.1 Systemkomponenten

Das aktuelle Car2X-Entwicklermodul MK5 von Cohda Wireless gibt es in zwei verschiedenen Ausführungen. Zum einen ist dies eine Variante zur Verwendung als OBU (On-Board-Unit) in Fahrzeugen und zum anderen als RSU (Road-Side-Unit) für straßenbegleitende Infrastruktur.

Das OBU-Kit wird in zwei Einzelkomponenten geliefert. Das Steuergerät ist in einem blauen Metallgehäuse untergebracht und bietet Anschlüsse für CAN, Ethernet, USB 2.0, Klinckenstecker und besitzt einen Micro-SD-Kartenslot. Über einen Erweiterungsslot könnten sich zusätzliche Schnittstellen wie zum Beispiel HDMI realisieren lassen. Das externe Antennenmodul wird über drei Kabel (1xGNSS, 2xWLAN) mittels FAKRA-Stecker an das Gerät angeschlossen. Bei dem Antennenmodul handelt es sich vermutlich um das Modell MGW-303 der Firma MobileMark. Es besitzt zwei Antennen für die WLAN-Kommunikation im IEEE 802.11p Standard bei 5,9 GHz und eine GPS-Antenne.

Das RSU-Kit ist in einem wasser- und staubdichten Gehäuse untergebracht. Die Antennen werden direkt an das Gehäuse geschraubt. Für die WLAN-Kommunikation kommen zwei Antennen des Modells ECO6-5500RN von MobileMark mit dem 802.11p Standard zum Einsatz. Um welches Modell es sich bei der GPS Antenne des RSU Kits handelt, konnte leider nicht festgestellt werden.



Abbildung 4.1: MK5 OBU (links) und RSU (rechts) mit Antennen

Die Steuergeräte in beiden Systemen sind identisch. Das Board besitzt einen Freescale i.MX6 Prozessor mit 1 GHz Taktung und 512 MB RAM. Für Betriebssystem und Anwendungen stehen 4 GB Speicher zur Verfügung. [25]

4.2 Inbetriebnahme der Hardware

Bei der OBU ist lediglich das Antennenmodul anzuschließen und die 12 V Stromversorgung herzustellen. Bei der Stromversorgung muss auf ein eigenes Netzteil zurückgegriffen werden. Für die Versorgung außerhalb des Fahrzeuges wurde das Labornetzgerät *FSP-1122* von Voltcraft eingesetzt. Für die Verwendung im Fahrzeug wurde ein Zigarettenanzündadapter mit Schalter genutzt oder eine direkte Verbindung zum Fahrzeugstromkreis hergestellt.

Für die Inbetriebnahme der RSU war es zuerst notwendig, alle Antennen an das Gehäuse anzuschrauben. Die Stromversorgung erfolgt über den Ethernetanschluss, sodass ein *Power-over-Ethernet* (PoE) Netzteil besorgt werden musste. Der *Digitus DN-95102 PoE Injector* ermöglicht die Versorgung des Moduls mit Strom sowie eine Weiterführung des Ethernets. Außerdem wurde der CAN-Anschluss des Entwicklerboards mittels Kabel außerhalb des Gehäuses zugänglich gemacht.

4.3 Entwicklungsumgebung

Für die Entwicklung der Software liefert Cohda eine *Software Development Kit* (SDK) mit. Dieses beinhaltet neben der Firmware auch eine virtuelle Maschine (VM). Als VM-Umgebung wird Ubuntu 14.04 in VMWare Player eingesetzt. Für die Programmierung steht die Software *Eclipse* mit *CDT*-Plugin zur Verfügung. Außerdem ermöglicht das SDK das Übertragen der Software auf die Module und Remote Debugging.

Auf Linux Systemen ist eine direkte Entwicklung auch ohne das SDK möglich, doch treten hierbei Einschränkungen auf. Bisher konnte das Kompilieren innerhalb der Entwicklungsumgebung Eclipse nicht erreicht werden und auch die Übertragung und Installation neuer Softwareversionen geschieht in diesem Fall per Hand. Durch einige selbstgeschriebene Shell-Scripte lässt sich das Kompilieren, Übertragen und Installieren jedoch ebenfalls weitestgehend automatisieren.

4.4 Softwarebasis

Sowohl die RSU- als auch die OBU-Einheit besitzen dieselbe Softwarebasis. Die mitgelieferte Firmware enthält unter anderem das Linux-Betriebssystem und Softwaremodule für die LAN/WLAN-Kommunikation, das GPS, die Nachrichtenkodierung und -dekodierung. Ein Schema zu den Funktionen, auf die Car2X-Programme zugreifen können, ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

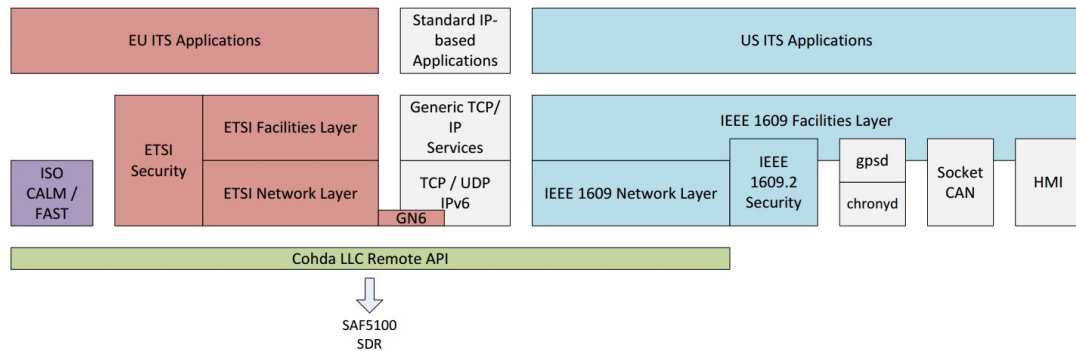


Abbildung 4.2: MK5 Software Blockdiagramm [25]

Neben diesen Basismodulen gibt es bereits weitere Programme die beispielsweise zur Gefahrenerkennung (Threat Detection Engine), Berechnung der Fahrtrajektorie, der Erkennung des Fahrzeugzustands mittels CAN-Bus sowie zur Ampelphasenerkennung genutzt werden oder eine Mensch-Maschine-Schnittstelle bereitstellen. Der Quellcode dieser Module liegt nicht offen. Für Entwickler bietet Cohda den Zugang zu diesen Modulen über Programmierschnittstellen, sogenannte APIs (application programming interfaces).

Des Weiteren gibt es verschiedene Dienstprogramme, um beispielsweise das GPS oder die drahtlose Kommunikation zu testen.

Um die Verwendung der APIs zu verdeutlichen und ein Grundgerüst für die Entwicklung eigener Car2X-Anwendungen zu bieten, sind zwei Beispielanwendungen vorhanden. Das Beispiel „example“ startet alle Basismodule für Kommunikation, GPS, Fahrzustand sowie anwendungs-spezifische Elemente je nach Konfiguration.

Die wichtigere Anwendung ist „exampleITS“. Ab Version 13 wurde diese in „ExampleETSI“ umbenannt. Diese Anwendung ermöglicht neben dem Start der verschiedene Module bereits einige Grundfunktionalitäten für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und die Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation.

Da Version 13 erst gegen Ende dieser Diplomarbeit erschienen ist, wurde darauf verzichtet, die eigenen Softwareentwicklungen auf dieses Release umzustellen. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf auch nur die Funktionalität der vorangegangenen Versionen betrachtet.

4.4.1 ExampleITS

Die Beispielanwendungen sind alle in der Programmiersprache C geschrieben. Die Anwendung ist in mehrere Komponenten unterteilt.

Die *main.c* ist das Hauptprogramm und startet alle Threads. Am Anfang der Datei wird die Verwendung der Anwendung „exampleITS“ erklärt. Die Datei *raw-its.c* ist für das Senden und Empfangen von benutzerdefinierten Car2X-Botschaften zuständig. Diese Botschaften werden von RAW.asn1 kodiert oder dekodiert.

Zum Senden und Empfangen standardisierter Botschaften werden drei Threads gestartet. Unterstützt werden CAM-, DENM- und seit Version 12 auch SPaT- und MAP-Botschaften.

Der Thread *its-ctrl-thr* regelt, welche Nachrichten aktiviert werden und welche nicht. Dies ist vor allem von der geladenen Konfigurationsdatei abhängig. Aus dieser wird neben der Aktivierung der jeweiligen Funktion auch deren Grundkonfigurationen eingelesen. Angelegt werden dabei die Konfigurationen für DENM (Baustellenwarnung) sowie SPaT- und MAP-Botschaften.

Im Thread *its-tx-thr.c* werden die Nachrichten entsprechend der Vorgaben aus ETSI EN 302 637-3 mit Daten gefüllt. Vorgelegt sind Nachrichten für Notbremsung (EEBL - Electronic Emergency Breaking Light), Baustellenwarnungen und deren Aufhebung sowie für SPaT-Nachrichten. Innerhalb des Threads werden die Grundkonfigurationen auf die Nachrichten übertragen und alle veränderlichen Parameter gesetzt. Anschließend werden die Nachrichten an die jeweilige API des ETSI ITS Facilities Layers übergeben und dort entsprechend kodiert und versendet.

Der Thread *its-rx-thr.c* wertet die empfangenen, dekodierten Botschaften aus. Im Werkzustand werden hier keinerlei weitere Funktionen aufgerufen. Funktionen zur Nutzung der empfangenen Daten wurden erst während der Diplomarbeit hinzugefügt.

Alle empfangenen CAN-Nachrichten werden in der `can-thr.c` verarbeitet. Grundsätzlich kann über Callbacks festgelegt werden, ob alle CAN-IDs relevant sind (`CAN_ID_PROMISCUOUS_MODE`) oder nur einzelne.

Abbildung 4.3 Zeigt den Aufbau der Anwendung `exampleITS`, wie sie von *Cohda Wireless* bereitgestellt wird. Volllinien stellen Callbacks, Punkt-Strich-Linien das interne Nachrichtensystem und Punkt-Linien API-Zugriffe dar.

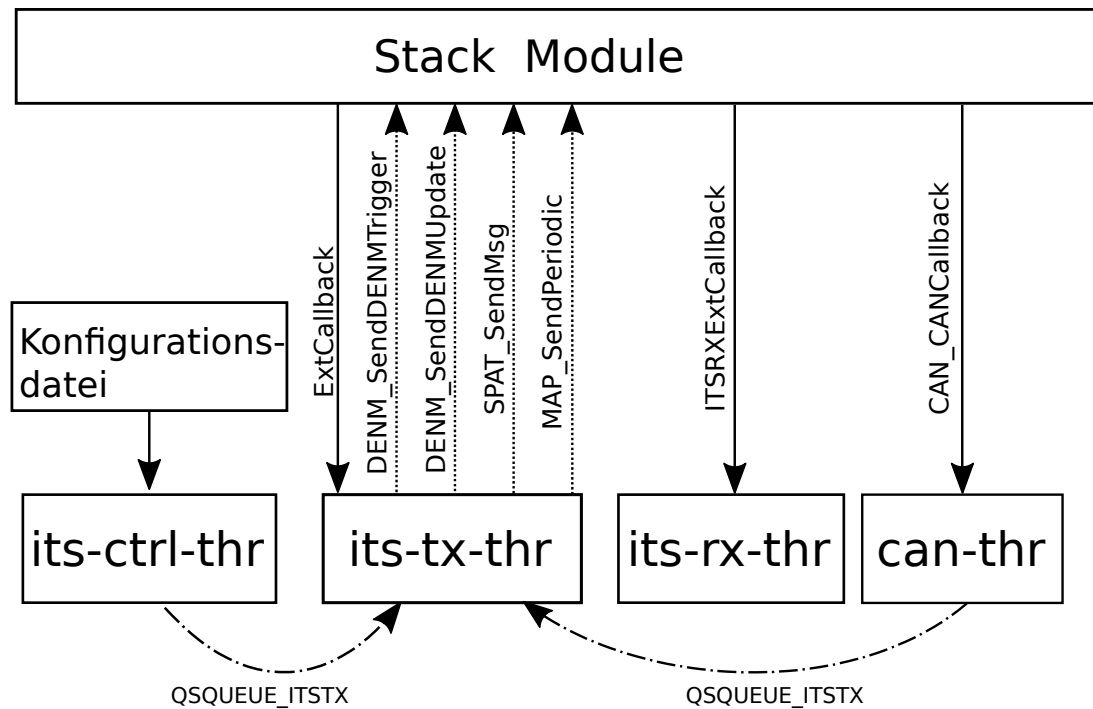


Abbildung 4.3: Aufbau `exampleITS`

4.4.2 Modifikationen der `exampleITS`

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde auf die Grundlage der `exampleITS` von *Cohda* aufgebaut. Sie wurde um Funktionen zur Verarbeitung bestimmter Botschaften und zum Versand weiterer Botschaften ergänzt. Außerdem wurde eine Möglichkeit geschaffen, CAN-Botschaften für den Versand mit Daten zu anzureichern.

Durch die Integration des internen Nachrichtensystems in `its-ctrl-thr` konnte die Deaktivierung oder Aktivierung bestimmter Car2X-Nachrichten während des Betriebs erreicht werden. So konnten beispielsweise bestimmte CANBotschaften eine DENM-Nachricht auslösen. Siehe dazu Kapitel 6.1 und 6.2.

Dem `its-tx-thr` Thread wurden drei weitere DENM-Botschaften für die Übertragung der CAN-Geschwindigkeit, für die Rettungsfahrzeugwarnung

(EVW - Emergency Vehicle Warning) und für die Warnung vor liegen gebliebenen Fahrzeugen hinzugefügt.

Alle mit der Ampelsteuerung und Generierung von SPaT-Botschaften zusammenhängenden Funktionen wurden in eine separate Quelldatei integriert. Das gleiche gilt für die Berechnungen und Relevanzbetrachtung für die Rettungsfahrzeugwarnung.

Der CAN-Thread war bisher nur für den Empfang von CAN-Botschaften ausgelegt. Da jedoch auch Daten über CAN ausgegeben werden sollten, wurde eine separate Funktion für die CAN-Ausgabe geschrieben. Herr Erik Unger realisierte diese in einer separaten Quelldatei. Während der Diplomarbeit wurde die Ausgabe je nach Bedarf erweitert. Innerhalb der Datei werden die Daten mittels Bit-Shifting den entsprechenden Daten-Bytes der CAN-Botschaft zugewiesen und schließlich über die CAN-API mit einer einzigartigen ID versendet.

Der Aufbau der erweiterten Version der exampleITS-Anwendung kann Abbildung 4.4 entnommen werden. Die neu hinzugekommenen Stichlinien stellen Funktionsaufrufe zu separaten Quelldateien (grau hinterlegt) dar.

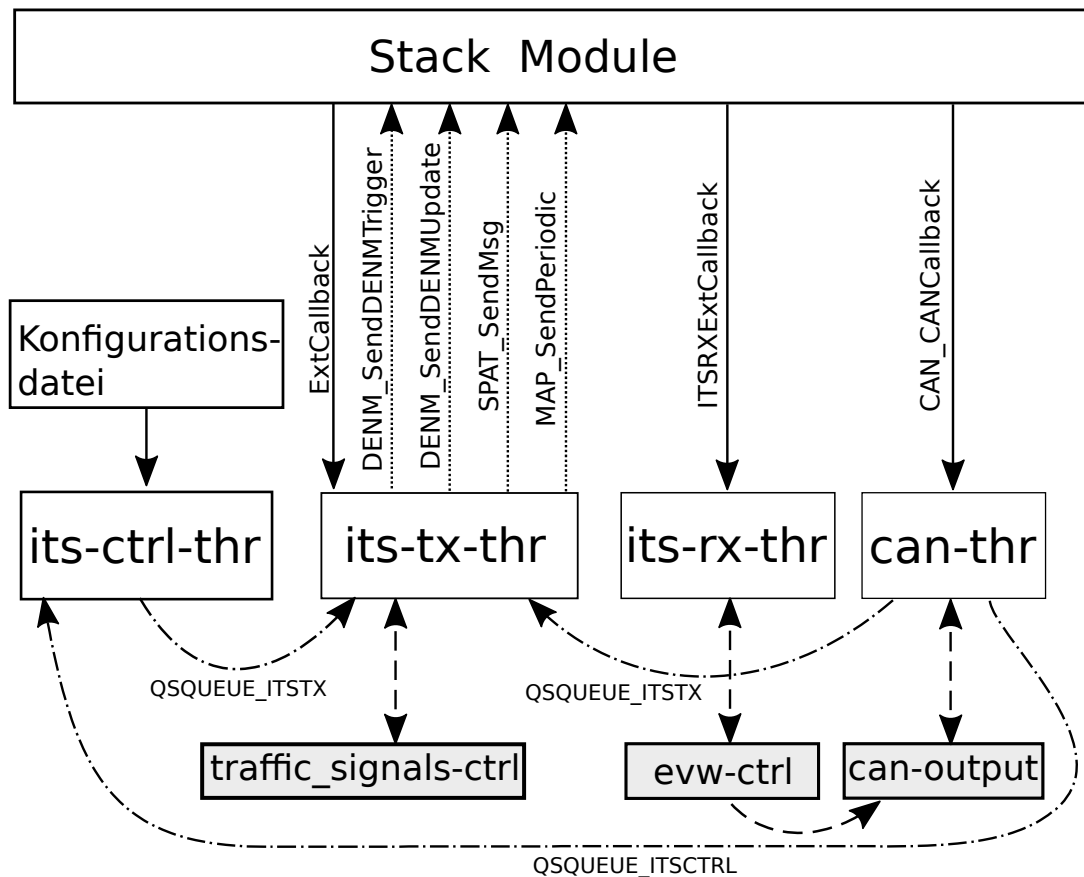


Abbildung 4.4: Aufbau exampleITS (modifiziert)

5 Messung GPS-Genauigkeit und CAM-Übertragung

Für die korrekte Funktionsweise von Car2X-Anwendungen ist eine genaue Positionsbestimmung unabdingbar. Dies wird besonders bei sicherheitskritischen Funktionen, wie aktiven Fahreingriffen, relevant. Die Entwicklermodule von Cohda Wireless bieten bisher nur die direkte Integration der Positionsbestimmung mittels GPS. Ohne Korrekturdaten oder Differenzstationen ist die satellitengestützte Positionsbestimmung relativ ungenau. Je nach Umfeld und atmosphärischen Einflüssen kann die Genauigkeit zwischen wenigen Dezimetern und mehreren dutzend Metern liegen.

Um herauszufinden, wie genau die Position des Fahrzeugs unter idealen Bedingungen mit den mitgelieferten GPS-Modulen bestimmt werden kann, wurde das Gesamtfahrzeugpraktikum auf dem *DEKRA Test Oval* in Klettwitz genutzt, um Daten zu sammeln. Mit den Versuchen sollte weiterhin festgestellt werden, wie verlässlich die Verbindung zwischen den Modulen funktioniert.

Es wurden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen Versuche mit immer demselben Ablauf vorgenommen, sodass die Versuchsbedingungen annähernd konstant waren.

5.1 Vorbereitung und Versuchsaufbau

Als Versuchsfahrten wurde eine Messfahrt für die Evaluierung des Fahrzeuggeräuschspegels nach DIN ISO 362-1 genutzt. Der Versuch wurde ein wenig abgeändert und um zusätzliche Messtechnik ergänzt, um zusätzlich auch die Daten für die Car2X-Kommunikation aufzeichnen zu können. Diese zusätzlichen Elemente wurden jedoch auch genutzt, um den Studenten die Umfeldsensorik näherzubringen.

In Abbildung 5.3 ist in schwarz-weiß das Testfeld für die Akustikmessung schematisch dargestellt, wie es in DIN ISO 362-1 spezifiziert ist.

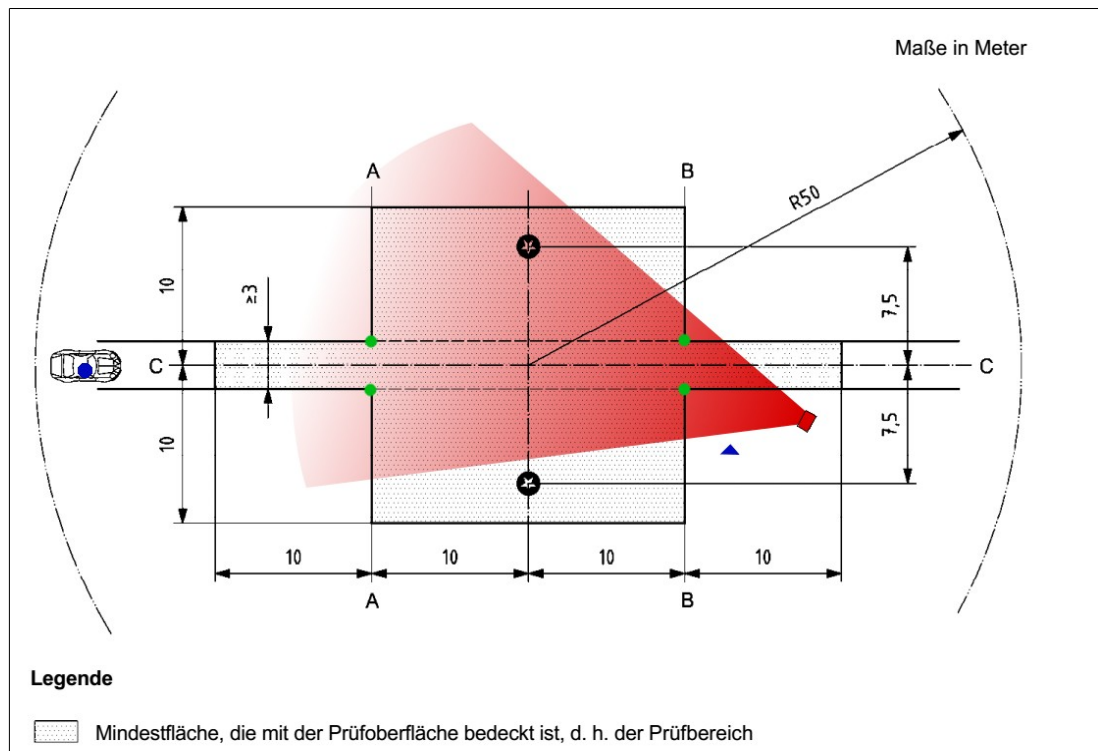


Abbildung 5.1: Abmessungen und Aufbau des Prüfgeländes zur Geräuschmessung [26]

Die farblichen Elemente sind zusätzliche Messtechnik und Aufbauten. In grün dargestellt sind vier Warndreiecke, die als Referenz für den Laserscanner dienen. Dieser wird als roter Kasten abgebildet. Der rote Kegel verdeutlicht die Öffnungsrichtung des Laserscanners. Das blaue Dreieck symbolisiert ein als RSU konfiguriertes Car2X-Modul und der blaue Kreis ein als OBU konfiguriertes Modul. Um eine Beziehung zwischen den geographischen Koordinaten des GPS-Empfängers und den Laserdaten herstellen zu können, wurden die vier Warndreiecke sowie die Position des Laserscanners mit einem *Leica Viva GS15* Vermessungssystem auf unter 2 cm Genauigkeit bestimmt. Zusätzlich wurden die angestrebte Start- und die Endposition des Fahrzeuges markiert und vermessen.

Am Fahrzeug selbst waren zwei Antennen und eine Handyhalterung angebracht (siehe Abbildung 5.2). In der Abbildung rot umkreist, ist das Antennenmodul für die OBU-Einheit und grün umkreist die WLAN-Antenne für das Wireless CAN. Die blau umrandete Handyhalterung wurde für GPS-Aufzeichnungen mit einem *Samsung Galaxy Ace* (GT-S5830) genutzt. Damit sollte ein Vergleich zwischen der Positionsgenauigkeit von handelsüblichen GPS-Geräten und dem für Car2X genutzten GPS gezogen werden können. Dieser Vergleich konnte jedoch aus zeitlichen Gründen nicht mehr realisiert werden. Es ist zu erkennen, dass alle Komponenten weit entfernt von den gelb gestrichelten Fahrzeugmit-

tenachsen liegen. Grund dafür war, dass die Magnetantennen nicht auf dem Panoramadach des Fahrzeuges befestigt werden konnten. Diese Abweichung galt es bei der Auswertung zu berücksichtigen. Das Car2X-Antennenmodul ist etwa 51 cm und die Handyhalterung circa 69 cm von der Mittelachse (d_x) entfernt. Die Entfernung d_y ist für die Car2X-Antenne etwa 65 cm und für die Handyhalterung beträgt etwa 25 cm. Mittels Trigonometrie lässt sich somit der Versatz zum Zentrum des Fahrzeuges bestimmen. Für die Car2X-Antenne beträgt dieser 82,6 cm und für die Handyhalterung etwa 73,4 cm.

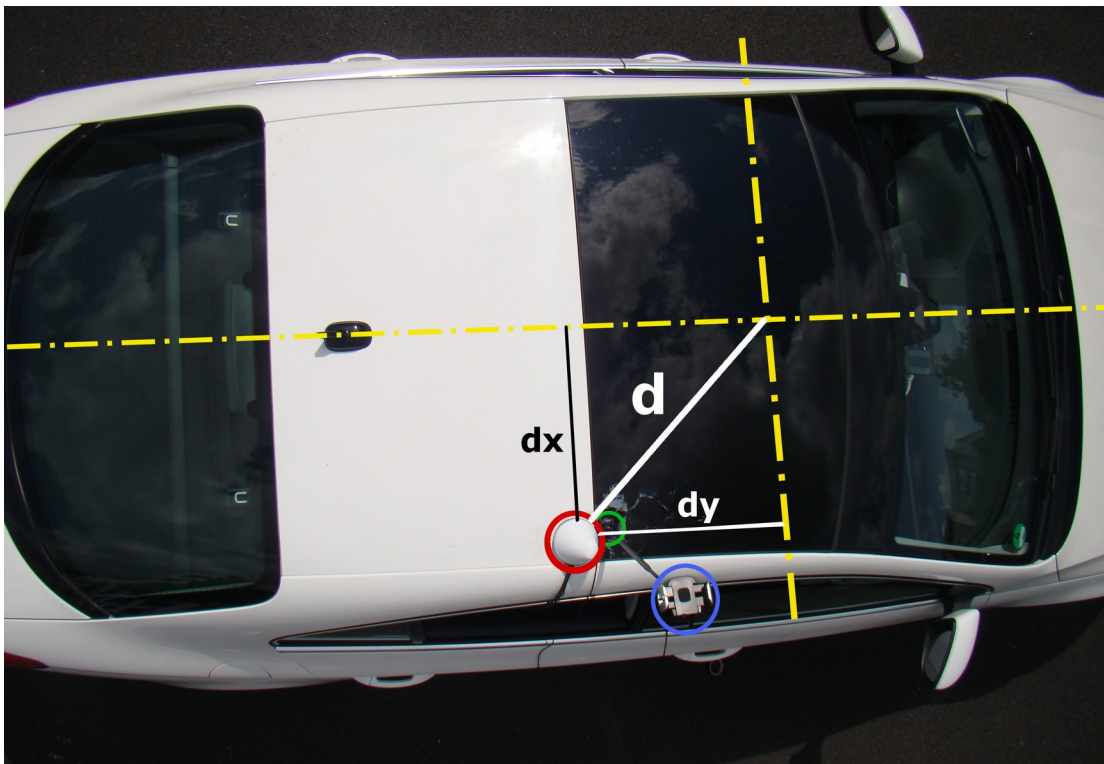


Abbildung 5.2: Antennenpositionen in Fahrzeugdraufsicht

Bei den Versuchen wurden neben der GPS-Position und -Geschwindigkeit, auch die Fahrzeugposition und -geschwindigkeit mittels Laserscanner bestimmt sowie der Schalldruckpegel und die fahrzeuginterne Geschwindigkeit aus dem CAN-Bus aufgezeichnet.

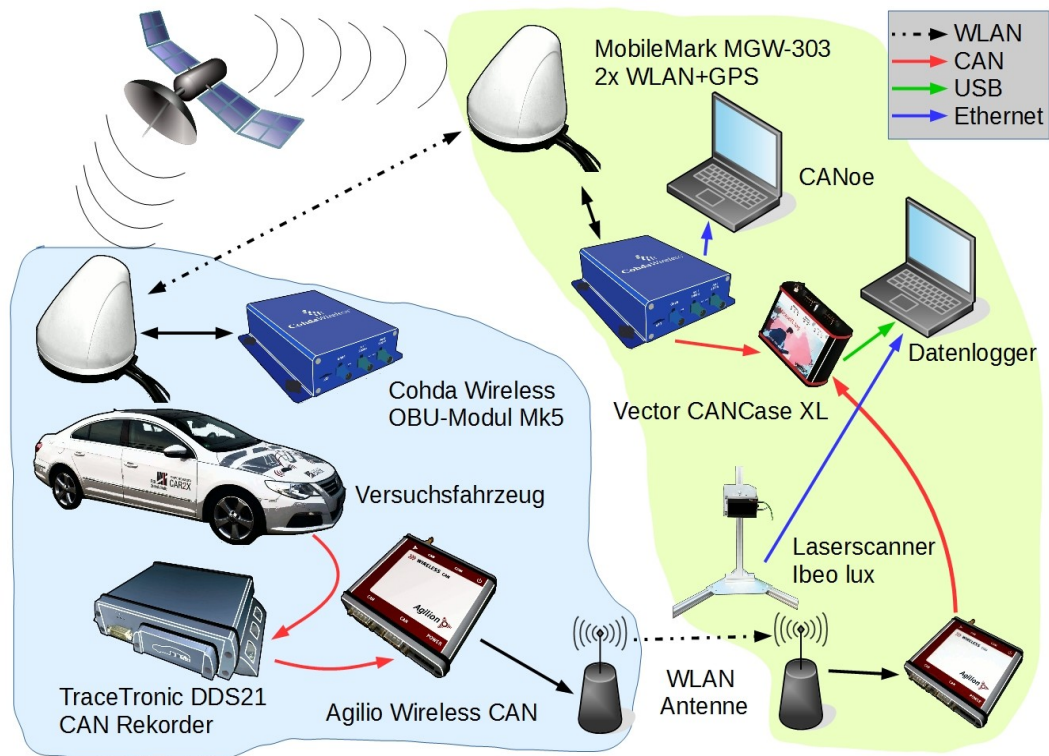


Abbildung 5.3: Messtechnik und Vernetzung

Die verwendete Messtechnik und deren Vernetzung sind in Abbildung 5.3 zu sehen. Außen vor gelassen wurde in der Grafik die Messtechnik für die Akustikmessung, da diese für die Car2X-Kommunikation keine Rolle spielt. Alle hellblau unterlegten Komponenten waren direkt im oder am Fahrzeug verbaut, während alle hellgrün unterlegten Elemente stationär waren. Da die Geschwindigkeit aus dem Fahrzeug-CAN nicht über die standardmäßigen CAM-Botschaften gesendet wird, sollte diese in einer DENM-Nachricht übertragen werden. Die Übertragung der CAN-Geschwindigkeit stellte sich jedoch als schwieriger heraus, als erwartet. Das Car2X-Modul wurde über den *TraceTronic DDS21 CAN Rekorder* an den CAN-Bus des Fahrzeuges angeschlossen. Dabei musste beachtet werden, dass das Modul selbst keine CAN-Botschaften sendet, da die CAN-Verbindung zwischen CAN-Rekorder und Mk5-Modul keine Arbitrierung beherrscht und es somit zu Kollisionen kommen würde, was zum Absturz des CAN-Bus führt.

Das Einlesen der CAN-Botschaft innerhalb des Moduls gestaltete sich recht einfach. Wie jedoch später festgestellt wurde, sollten die verwendeten CAN-Botschaften gefiltert werden. Bei vielen Botschaften kam das Modul mit der Softwareversion 11 sonst an seine Leistungsgrenzen und

wurde träge. In neueren Releases scheint eine Vielzahl von CAN-Botschaften kein Problem mehr zu sein. Die Filterung kann vor dem Modul, aber auch softwareseitig im Modul durchgeführt werden. Die Filterung vor dem Modul wurde mit dem Steuergerät FlexDevil von TZM getestet. Es ist jedoch die Filterung innerhalb des Moduls zu bevorzugen, da keine weitere Hardware benötigt wird.

Die aus dem CAN-Bus eingelesene Geschwindigkeit wurde über die interne Nachrichtenwarteschlange als Payload an den Sendethread übertragen. In einer speziell dafür angelegten DENM-Botschaften wurde der Wert für die sonst übermittelte Höhe durch die Geschwindigkeit ersetzt. Die DENM-Botschaft wurde mit einem nicht standardisierter CauseCode versehen, um Verwechslungen auszuschließen.

Bei Vortests wurde jedoch festgestellt, dass es zu starken Zeitverzögerungen und Verbindungsaussetzern kam, wann immer diese Nachricht gesendet wurde. Dies hing zum einen mit der erst fehlenden Filterung der CAN-Botschaften zusammen. Jedoch auch nach Anpassung blieb das Problem in etwas abgeschwächter Form bestehen.

Aus diesem Grund wurde beschlossen, für die Versuche in Klettwitz die Übertragung des CAN-Signals über die Car2X-Module zu verzichten und nur das Bewegungsprofil aus den CAM-Nachrichten aufzuzeichnen. Zur Übertragung der CAN-Geschwindigkeit wurde versucht eine Wireless CAN Brücke von Agilion einzusetzen. Bei den Versuchen zeigte sich jedoch, dass diese auch nicht immer zuverlässig funktionierte. Da die Übertragung nur bei wenigen Versuchen ausreichend stabil funktionierte, wird auf eine Auswertung der Geschwindigkeit verzichtet.

Die per GPS ermittelte Geschwindigkeit des Fahrzeuges wurde aus den kontinuierlich gesendeten CAM-Botschaften extrahiert und von der RSU auf einen lokalen CAN-Bus geschrieben. Sowohl die per Wireless CAN übertragene, als auch die per CAM-Nachricht gesendete Geschwindigkeit wurden in einem CANcaseXL der Vector Informatik GmbH eingelesen und per USB an einen Computer weitergeleitet. Neben der Geschwindigkeit wurden weitere Parameter wie zum Beispiel die Anzahl der Satelliten per CAN-Botschaft ausgegeben.

Über die Ethernet-Schnittstelle der RSU konnten zeitgleich die Positionsinformationen der OBU aus den CAM-Botschaften und die der RSU auf einen zweiten Computer übertragen werden. Auf diesem lief das Pro-

gramm CANoe von Vector. Damit ist es möglich, die Position sowohl des Fahrzeuges als auch der festen Station auf einer Karte zu visualisieren.

Der Laserscanner war, wie in Abbildung 5.1 zu sehen, am Ende der Geräuschmessstrecke leicht schräg zur Fahrbahn aufgestellt. Dadurch wird das Fahrzeug in der Punktwolke des Laserscanners als L-förmiges Objekt erfasst. Angeschlossen war der Laserscanner per Ethernet an den Messrechner. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte mit einem von Herrn Erik Unger geschriebenen Programm. Es werden für die Messwerte zwei Dateien angelegt. Eine CSV-Datei (Comma Separated Values), welche die gesamten Laserscannerdaten enthält und eine ASC-Datei (Adobe ActionScript) mit allen CAN-Daten.

Nach den Versuchen in Klettwitz wurde die Firmware des Moduls auf die neueste Version 34146 aktualisiert. Dafür musste auch Teile des Programmcodes umgeschrieben werden, um die bereits programmierten Funktionen wieder nutzbar zu machen. Durch das Upgrade und ein wenig Veränderungen am Programmcode gelang es, das Senden der Geschwindigkeit wie ursprünglich vorgesehen zu realisieren, ohne dass es zu Aussetzern und Zeitverzögerungen kam. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.4 zu sehen.

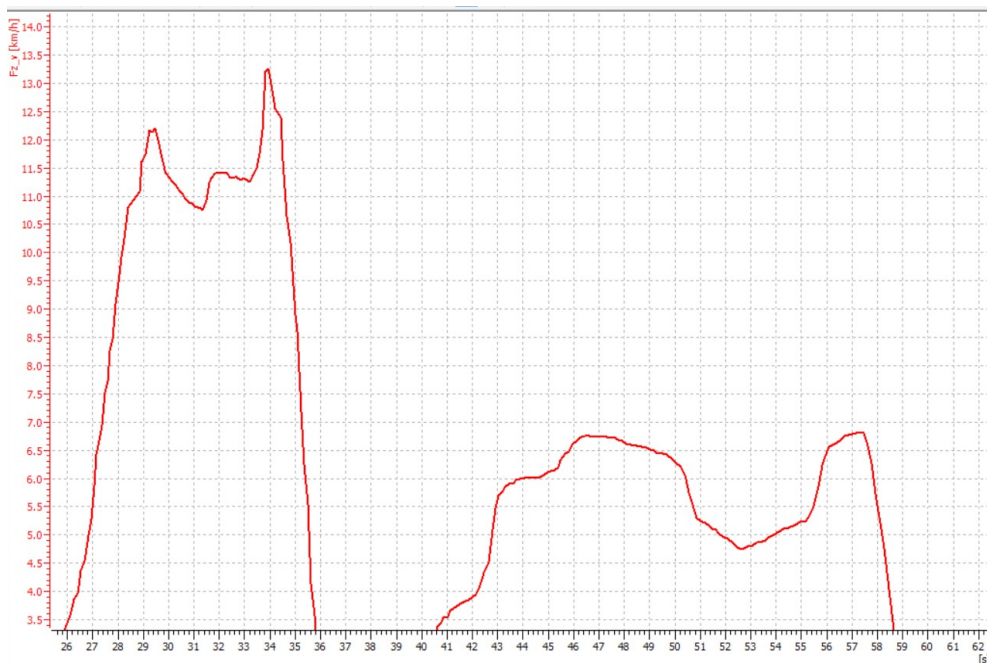


Abbildung 5.4: Übertragene CAN-Geschwindigkeit über DENM-Botschaft

5.2 Versuche

Ursprünglich waren nur zwei verschiedene Versuche geplant. Es handelt sich dabei um die beiden vorgeschriebenen Messfahrten für die Akustikmessung eines Fahrzeuges mit Automatikgetriebe nach DIN ISO 362-1, wobei eine der Fahrten mit konstanten 50 km/h innerhalb des Messfeldes durchgeführt wird. Die andere Messfahrt wird mit 50 km/h angefahren. Ab dem Eintritt in den Messbereich muss voll beschleunigt werden.

Ergänzend wurden vor Ort zwei weitere Tests dem Portfolio hinzugefügt. Zum einen war dies eine durchgehende Vollbeschleunigung bei verkürztem Anlauf und zum anderen ein Einparkmanöver mit dem im Fahrzeug verbauten Parkassistenten. Für letzteren Versuch wurden die beiden anderen Versuchsfahrzeuge des Teststandes genutzt, um eine Parklücke zu bilden. Für die Auswertung der GPS-Daten wurde jedoch lediglich die große Anzahl an Akustikmessfahrten genutzt.

Vor und nach jeder Fahrt wurde am Start- beziehungsweise Endpunkt für circa 30 s verharrt. Dadurch konnte überprüft werden, wie die GPS-Position im Stand wegdriftet.

5.3 Auswertung

Als Erstes wurden die Daten des Laserscanners und die CAN-Daten mit dem Programm Matlab von TheMathWorks eingelesen. Da die Positionsdaten aus der Car2X-Kommunikation noch den in Kapitel 5.1 angesprochenen Versatz aufwiesen, musste dieser als Erstes korrigiert werden. Dazu wurde der Versatz mit den umgestellten Formeln aus Kapitel 3.4.3 und 3.4.4 und der durchschnittlichen Fahrtrichtung auf der geraden Messstrecke auf einen Versatz in Längen- und Breitengrad umgerechnet.

Die korrigierten Daten wurden anschließend in einen Abstand zum Laserscanner in Nord-Süd-Richtung (latitudinal) und Ost-West-Richtung (longitudinal) umgerechnet. Dafür wurden die Formeln 3.4 und 3.5 genutzt. Eine Darstellung der unkorrigierten und korrigierten GPS-Daten ist in Anlage 5.1 zu sehen. Darin wird erkenntlich, dass durch den Versatz die GPS-Spuren nun relativ mittig erscheinen. Darauf ist außerdem die Position der Messaufbauten vor Ort sichtbar. Die Diagramme sind genordet und die Fahrtrichtung verlief von oben rechts (Nordnordost) nach links unten (Südsüdwest). Der Straßenverlauf ist sehr gerade, sodass für

die gesamte Strecke eine durchschnittliche Fahrtrichtung von 192° angenommen werden kann. Als Hintergrundkarte dient OpenStreetMap. Der Versatz wird auch in folgender Abbildung 5.5 an einer GPS-Spur sichtbar.

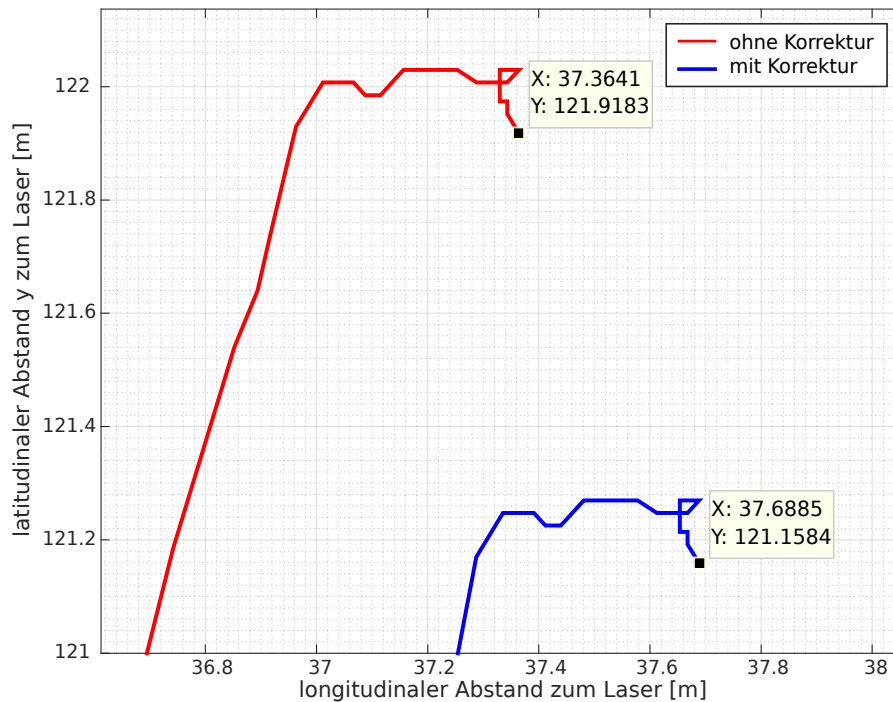


Abbildung 5.5: Korrektur der GPS-Daten

Berechnet man aus den Differenzen der Koordinaten der markierten Punkte mittels Trigonometrie den Abstand, so erhält man 0,8262 m. Dies entspricht ziemlich genau dem Abstand von 82,6 cm, der am Fahrzeug gemessen wurde. Der Versatz wurde also korrekt eingerechnet.

Der Farbbalken in Anlage 5.1 zeigt die Einfärbung der Spuren in Abhängigkeit von der Versuchsgruppe. Da die Versuche immer von nur einem Fahrer durchgeführt wurden, bedeutet dies, dass alle Fahrten eines Fahrers die gleiche Farbe haben. An beiden Tagen waren jeweils sieben Versuchsgruppen eingeteilt. Die Fahrten der Gruppen 1 bis 7 haben am 2. Juli 2015 stattgefunden und die der Gruppen 8 bis 14 am darauffolgenden Tag.

Zur Auswertung wurde ein Referenzpunkt auf der vermessenen Mittellinie auf Höhe der Pylonen 3 und 4 gelegt. Von diesem ausgehend wurde eine Vergleichsstelle mit einem Abstand entgegen der Fahrtrichtung von 5 m festgelegt. Dazu wurde das gesamte Koordinatensystem mittels Drehtransformation auf die Richtung der Straße gedreht. Gezeigt wird dies in Anlage 5.2. Dieser Punkt wurde gewählt, da der relativ geringe Abstand und der Winkel zum Laserscanner bereits eine sehr gute Punkt-

wolke ermöglichen. Bei weiteren Abständen kam es hingegen zu größeren Unsicherheiten in der Laserdatenauswertung.

Es wurden Diagramme erstellt, welche die Abweichung der GPS-Spuren quer zur Fahrbahn darstellen. Spuren mit besonders hoher Abweichung von der Mittellinie wurden anschließend noch einmal separat betrachtet und mit den Laserscannerdaten verglichen.

Bei der Auswertung der Laserdaten ist Vorsicht geboten. Bei der Erkennung unbekannter Objekte verändert sich das erkannte Außenmaß, wie in Abbildung 5.6 zu sehen, je nach Position und Abstand des Fahrzeuges. Die rot und die grün umkreisten Box stellen dasselbe Fahrzeug, nur bei unterschiedlichen Abständen zum Laserscanner dar. Aus diesem Grund wird angestrebt, für die Auswertung eine feste Box mit den Fahrzeugmaßen zu verwenden. Durch Sensordatenfusion mit dem Car2X-System könnte dies in Zukunft auch im normalen Straßenverkehr möglich sein. Durch die Position des Laserscanners ergibt sich in der Punktwolke eine L-Form an der rechten vorderen Ecke. Diese ist demzufolge auch der günstigste Bezugspunkt für die Box mit fester Größe. Wie in Abbildung 5.6 jedoch erkennbar ist, stellt der Eckpunkt der vorher berechneten Box nicht immer eine Fahrzeugecke dar. Bei größeren Entfernungen wurden aufgrund des flachen Winkels und der zu geringen Auflösung, zu wenige Laserimpulse von der Seitenfläche des Fahrzeuges zurückgeworfen. Dadurch ergibt sich vor allem eine Punktwolke an der Fahrzeugfront. Dies führt dazu, dass sich die Tracking-Box verdreht und der Bezugspunkt auf die Mitte der Fahrzeugfront wandert. Im Nahbereich ist die L-Form viel ausgeprägter und somit auch die Richtung und Größe der Box deutlich präziser.

In der folgenden Abbildung sind die Rohdaten des Laserscanners als farbige Punkte in Abhängigkeit der Scanebene dargestellt. Außerdem werden erkannte Objekte mittels blauer Tracking-Box visualisiert. Der rote Punkt innerhalb der Boxen gibt den Schwerpunkt der für die Box verwendeten Rohdaten an. Die daran angreifende schwarze Linie stellt den Geschwindigkeitsvektor dieses Punktes dar.

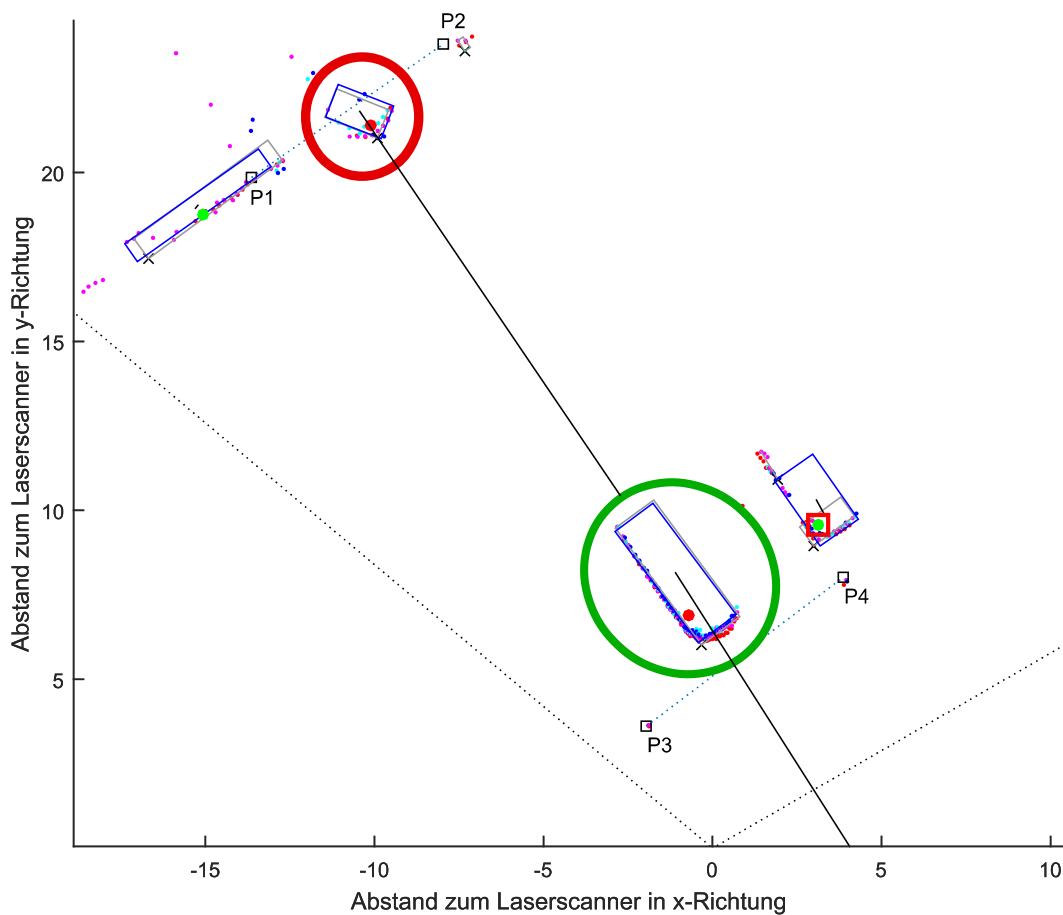


Abbildung 5.6: Objekttracking in den Laserscannerdaten

Zur Korrektur der Werte wurde als Erstes die Tracking-Box entsprechend der Fahrtrichtung gedreht. Dies gelang über einen Vergleich der Geschwindigkeitsrichtung mit der Boxausrichtung. Da der Bezugspunkt jedoch trotzdem noch nicht auf dem Fahrzeugeckpunkt lag, wurde ein Korrekturfaktor ermittelt. Dieser ist über den Kosinus abhängig vom Verdrehwinkel der ursprünglichen Box. Nachdem der Bezugspunkt korrigiert war, konnte eine Box mit den realen Fahrzeugmaßen aufgespannt und deren Mittelpunkt über den Verlauf ermittelt werden.

Durch diese Maßnahmen konnte der Mittelpunkt des Fahrzeuges sowohl im Fernbereich, wie auch im Nahbereich exakter verfolgt werden. Abbildungen dazu finden sich in Anlage 5.3. Die Anpassung an die Rohdaten wurde für jede ausgewertete Messung so genau wie möglich gemacht.

Neben der GPS-Genauigkeit während der Fahrt wurde auch der Drift der GPS-Position im Stand ausgewertet. Dazu wurden am Anfang und am Ende jeder Fahrt alle Punkte genutzt, deren Geschwindigkeit unter 0,5 km/h lag. Diese wurden anschließend in zwei Diagrammen dargestellt.

5.4 Ergebnisse Geräuschmessstrecke

5.4.1 GPS-Drift

Als Erstes wird sich dem Wegdriften der GPS-Position während der 30-sekündigen Standzeit am Anfang und Ende jeder Messung zugewendet. Dazu werden die GPS-Positionen in Abbildung 5.7 dargestellt.

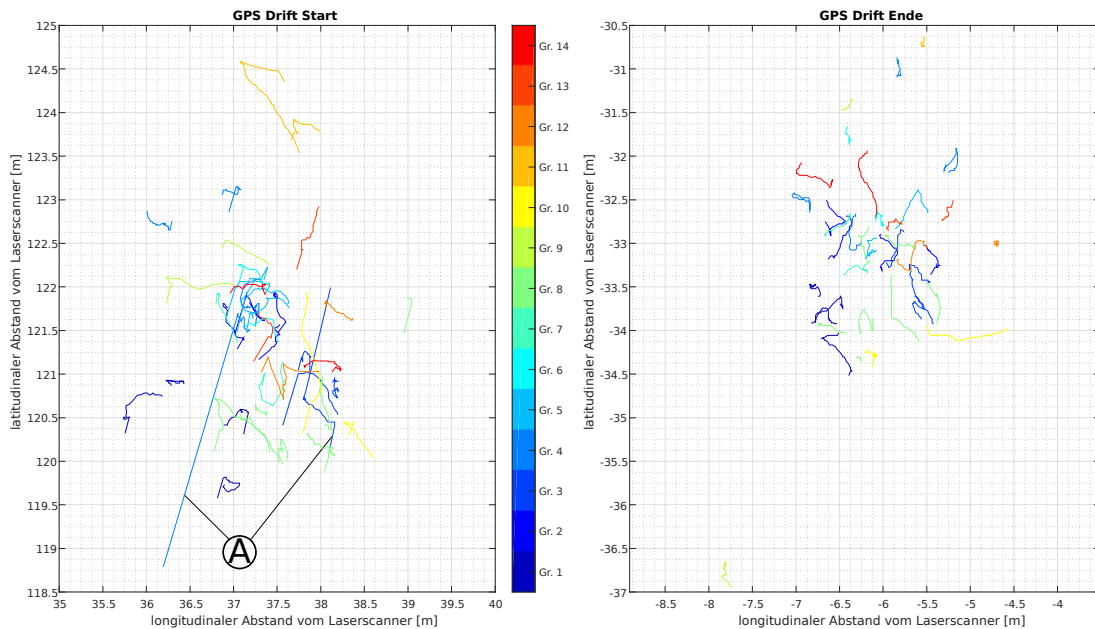


Abbildung 5.7: GPS Drift am Start- und Endpunkt

Zu erkennen ist, dass die Positionen am Anfangspunkt mehr streuen als die am Endpunkt. Dieses Verhalten entspricht nicht dem, was erwartet wurde. Angenommen wurde, dass die Positionen am Beginn enger beieinander sind als die am Ende, da der Verzögerungsweg nach der Akustikmessfläche relativ knapp bemessen war und daher mit einer recht hohen Verzögerung gebremst werden musste. Am Start stand hingegen mehr Zeit zur Verfügung, um das Fahrzeug korrekt zu positionieren.

Auch der durchschnittliche maximale Drift war mit 0,626 m am Startpunkt höher als am Endpunkt mit 0,362 m. Das Gleiche gilt für die Streuung der maximalen Drifts. Für den Startpunkt ergab sich eine Standardabweichung von 0,489 m und für das Ende von 0,207 m. Die Driftdistanz sowie die Standardabweichung sind damit beide am Endpunkt nur etwa halb so groß wie am Startpunkt.

Ein Teil des Unterschiedes lässt sich durch einzelne Ausreißer erklären, die im Diagramm für den Start zu sehen sind. Diese sind mit **A** gekennzeichnet. Doch selbst wenn diese nicht mit einbezogen werden, ist noch erkennbar, dass die Genauigkeit und die Streuung am Endpunkt besser

sind als am Anfangspunkt. Es müssen also weitere Einflussfaktoren in Betracht gezogen werden.

Da die Präzision, mit der die Fahrer an den beiden Punkten gestanden haben, wohl eher entgegen der Daten am Anfang besser gewesen sein dürfte als am Ende, ist davon auszugehen, dass in diesem Fall andere Effekte überwiegen. Eine mögliche Erklärung wäre die Art und Weise wie der GPS-Empfänger arbeitet und wie die Versuche durchgeführt wurden. GPS-Empfänger nutzen oft vorangegangene Messpunkte, um den nächsten Punkt voraussagen zu können. Dies hilft dabei, die Position zu verbessern und Sprünge in der GPS-Fahrkurve zu reduzieren. In den Versuchen wurde der Anfangspunkt teilweise unterschiedlich angefahren. So wurde unter anderem nahe dem Startpunkt gewendet oder gar rückwärts bis zum Startpunkt gefahren. Teilweise wurde jedoch auch in größerer Entfernung gewendet und dann zum Punkt gefahren. Der Einbezug der vorangegangenen GPS-Punkte könnte sich daher durchaus unterschiedlich auf die Positionsbestimmung ausgewirkt haben. Am Endpunkt hingegen sind alle Fahrer aus der gleichen Richtung kommend mit ähnlicher Verzögerung und Geschwindigkeit an den Punkt herangefahren, sodass bei einem Einbeziehen vorangegangener Punkte für alle Fahrten ein ähnlicher Ausgangszustand vorlag.

Eine generelle Veränderung des Drift-Verhaltens über den Tagesverlauf oder zwischen den beiden Versuchstagen ist nicht erkennbar.

Das Driftmaß ist unter den sehr guten Versuchsbedingungen als akzeptabel zu bewerten. Innerhalb der Stadt könnte der Drift jedoch vermutlich schnell Größen erreichen, bei denen sich eine falsche Spurzuordnung ergeben könnte.

5.4.2 GPS Genauigkeit

Als Erstes werden nur die GPS-Spuren des Car2X-Systems für sich betrachtet. Im Anschluss werden besonders auffällige Spuren mit den vom Laserscanner ermittelten Werten verglichen.

In Anlage 5.4 befinden sich die Diagramme für beide Tage zusammen und für jeden Tag einzeln. Die Mittellinie der Fahrbahn wird darin durch die gestrichelte schwarze Linie repräsentiert.

Im Diagramm für beide Tage ist erkennbar, dass eine Mehrzahl von Spuren in Fahrtrichtung rechts (im Diagramm links) neben der Mittellinie lie-

gen. Dies zeigt auch die Durchschnittslinie, die als schwarze Volllinie im Diagramm zu sehen ist. Die mittlere Abweichung auf der Höhe bei 5 m Abstand zum Referenzpunkt beträgt jedoch nur rund 24 cm. Die Verschiebung in diese Richtung könnte zum Teil durch den Einfluss des Fahrers entstanden sein, da dieser sich im Fahrzeug links neben der Fahrzeugmitte befindet. Auf dem Testfeld gab es auch keine Mittelmarkierung, an der sich der Fahrer hätte orientieren können. Die Abweichung zur Mittellinie ist im Durchschnitt dennoch recht gering. Interessanter ist daher die Streuung der Werte. Die Standardabweichung beträgt für alle Fahrten 0,75 m. Dies bedeutet, dass sich die GPS-Spuren im Mittel trotz Streuung innerhalb im Rahmen einer Fahrspurbreite bewegen würden. Es lohnt sich jedoch, einen Blick auf die größten Abweichungen zu werfen, die während der Versuche aufgetreten sind.

Die größte positive Abweichung zur Mittellinie trat bei einer Fahrt der Gruppe 12 auf. Die Abweichung beträgt für die erste Fahrt dieser Gruppe etwa 1,08 m. Die anderen Fahrten, die in Fahrtrichtung links der Mittellinie liegen, befinden sich alle innerhalb eines Bereichs von maximal 65 cm. Für den späteren Vergleich mit den Laserscannerdaten wurde daher nur die erste Fahrt der Gruppe 12 ausgewählt.

Die größten negativen Abweichungen in negativer Richtung traten bei Gruppe 1, sowie Gruppe 9 auf. Die vierte Fahrt der ersten Gruppe liegt etwa 1,20 m von der Mittellinie entfernt und die erste Fahrt der neunten Gruppe entspricht in etwa 1,08 m. Rechtsseitig wiesen jedoch auch weitere Fahrten der Gruppen 3, 9 und 14 eine größere Abweichung zwischen 0,76 m und 1,06 m auf. Für den Vergleich mit den Laserdaten wurden letztlich nur die beiden am weitesten entfernten Spuren von Gruppe 1 und Gruppe 9 ausgewählt.

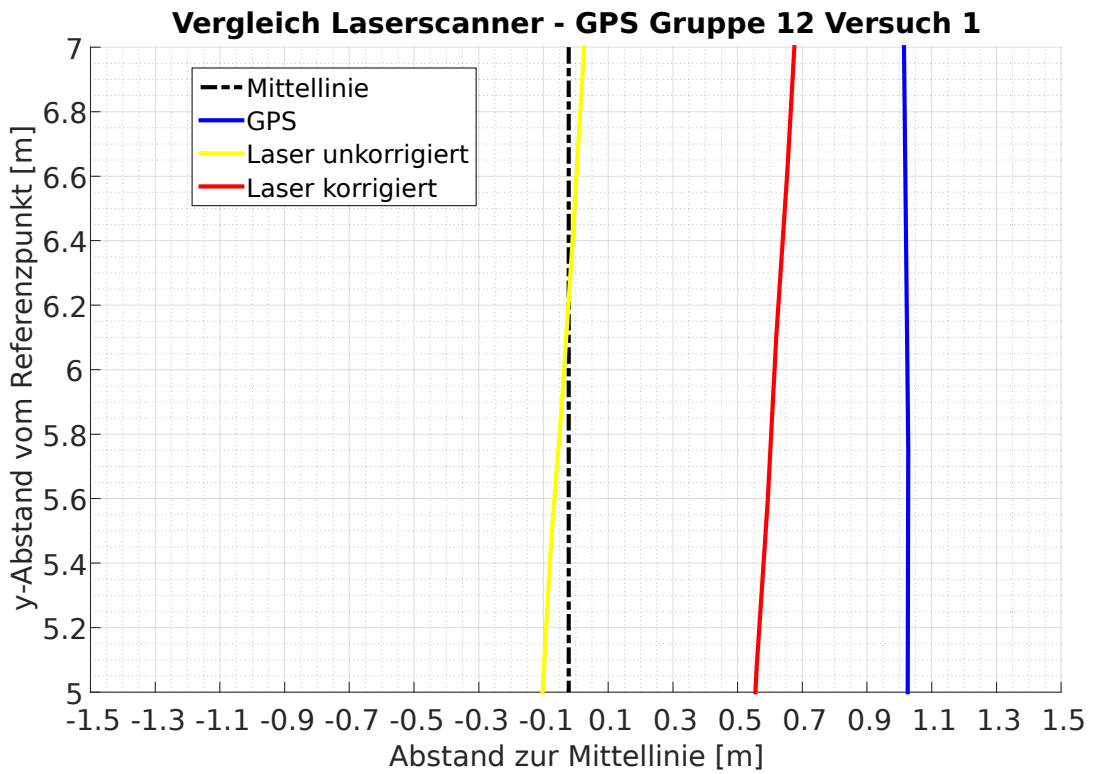
Als nächstes folgt die Betrachtung der Tage getrennt voneinander, um eventuelle Veränderungen zwischen den Tagen, aber auch über den Tagesverlauf erkennen zu können.

Für die Gruppen des ersten Tages hat ein Großteil der GPS-Spuren in Fahrtrichtung einen rechtsseitigen Versatz. Diese einseitige Verschiebung schlägt sich auch in der durchschnittlichen Abweichung nieder. Sie beträgt etwa 40 cm. Die Streuung der Fahrten ist jedoch relativ gering. Berechnet wurde eine Standardabweichung von 0,5 m.

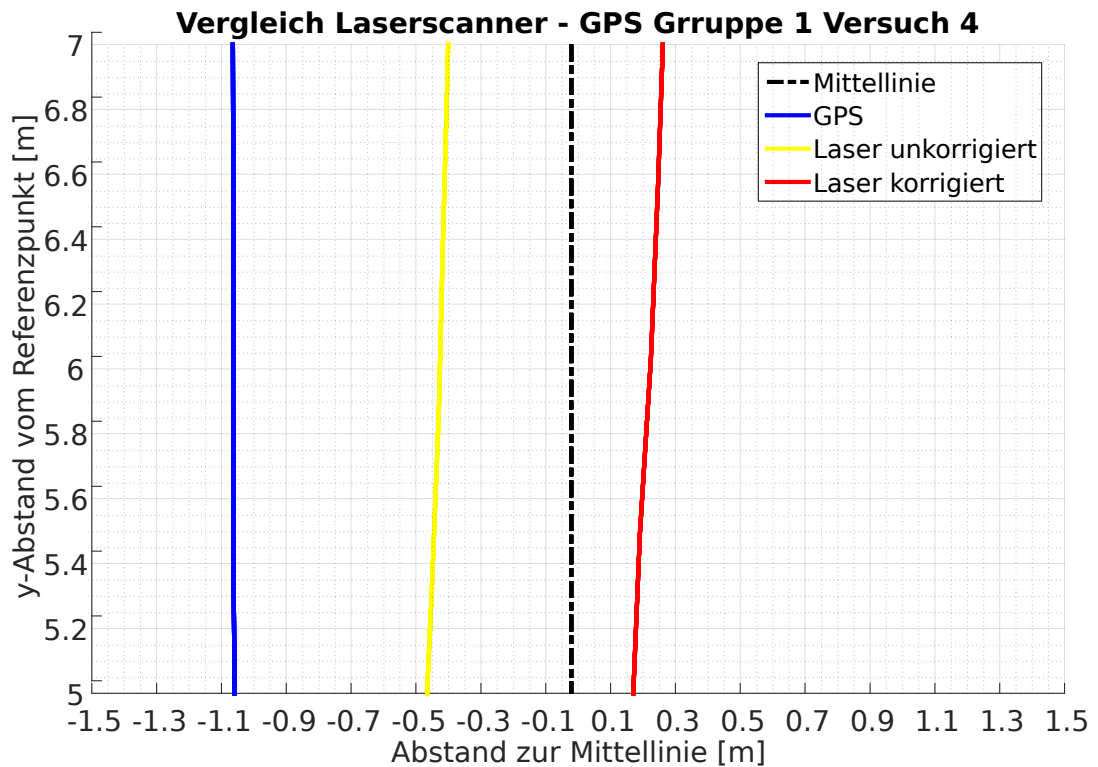
Ein Drift der GPS-Daten über den Tagesverlauf ist aus den Daten nicht ersichtlich. Zu sehen ist jedoch, dass es Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen gibt. Während beispielsweise bei Gruppe 1 die Fahrten relativ große Abweichungen und eine große Streuung aufweisen, sind sie bei Gruppe 5 deutlich näher an der Mittellinie und haben eine geringere Streuung. Die GPS-Bedingungen, wie beispielsweise P-DOB und ionosphärische Einflüsse, sollten innerhalb einer Gruppe keine großen Auswirkungen haben, da die einzelnen Fahrten alle innerhalb weniger Minuten durchgeführt wurden. Da sich die betrachtete Stelle außerdem weit genug vom Startpunkt entfernt befindet, sollte anders als beim GPS-Drift die vorangegangenen GPS-Punkte keinen großen Einfluss haben. Damit wird vermutlich ein Großteil der Streuung durch den Fahrer selbst beeinflusst. Am zweiten Versuchstag waren die Werte deutlich anders verteilt. Der mittlere Versatz liegt hier bei unter 10 cm. Dafür ist jedoch die Streuung deutlich höher. Die Standardabweichung beträgt 1,94 m. Auch hier ist kein klarer Trend über den Tagesverlauf erkennbar.

Vergleich mit den aufgezeichneten Laserscannerdaten

Abbildung 5.8 zeigt den Vergleich der Daten für den ersten Versuch der Gruppe 12. Darin ist zu erkennen, dass die korrigierten Laserdaten immer noch einen leichten Drift aufweisen. Dies konnte auch im Vergleich mit den Rohdaten gesehen werden. Für diese Auswertung sollte die Genauigkeit jedoch genügen. Gruppe 12 war der Versuch mit der größten positiven Abweichung von der Mittellinie. Dies ist jedoch dem Diagramm entsprechend nicht allein auf die Ungenauigkeit des GPS zurückzuführen. Der Fahrer ist in diesem Fall leicht in Fahrtrichtung links versetzt gefahren. Rechnet man diesen Versatz mit ein, beträgt die Abweichung des GPS auf Höhe der 5 m Marke nur noch etwa 70 cm.



Für Gruppe 1 ergibt sich ein anderes Bild. In Abbildung 5.9 ist zu erkennen, dass der Fahrer ebenfalls leicht in Fahrtrichtung links versetzt gefahren ist. Die Abweichung ist zwar, mit etwa 17 cm sehr gering jedoch vergrößert sich dadurch die effektive Abweichung des GPS-Signals auf etwa 1,20 m.



Für Gruppe 9 reduziert sich der Versatz des GPS-Signals ein wenig. Der Fahrer ist bei diesem Versuch ein wenig in Fahrtrichtung rechts neben der Mittellinie gefahren. Die effektive Abweichung beträgt jedoch selbst unter Einbezug der negativen Abweichung von 20 cm noch circa 85 cm.

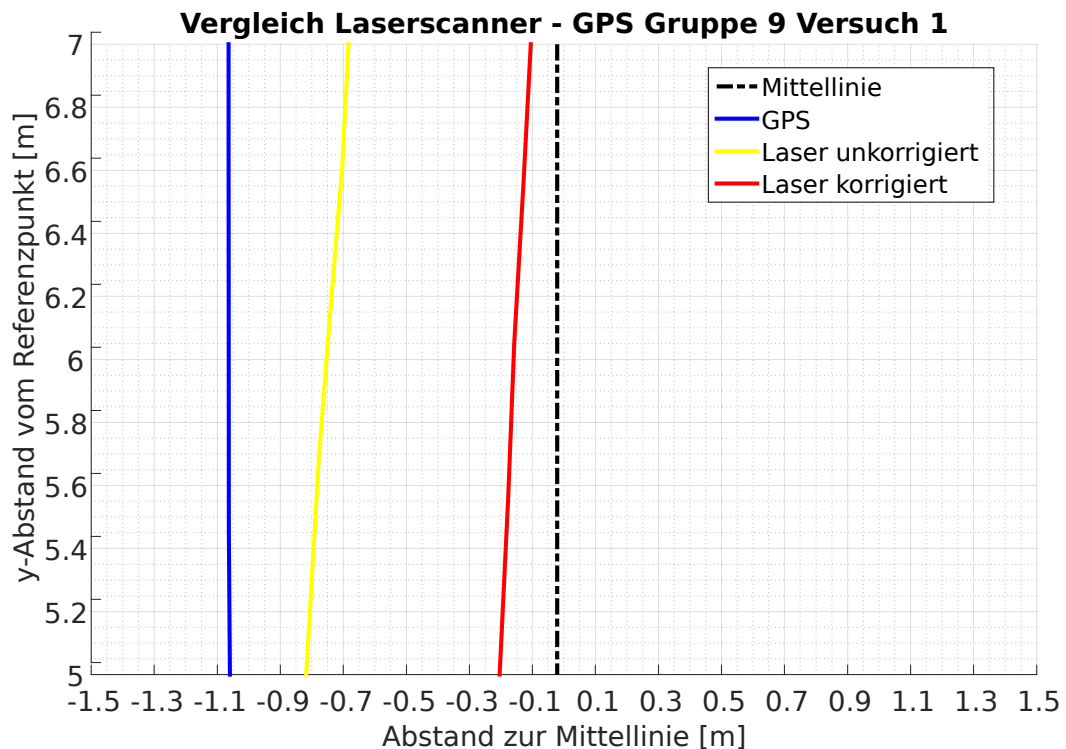


Abbildung 5.10: Vergleich Gruppe 9 Versuch 1

5.5 Zusammenfassung GPS-Genauigkeit

Die minimale Spurweite für normale Straßen der Entwurfsklassen ELK 1 bis 4 ist mit 3,50 m definiert [27 (Kap. 4.2)]. Die maximalen ermittelten Abweichungen im vorliegenden Testfall lagen bei 1,20 m. Es kann also davon ausgegangen werden, dass unter diesen idealen Bedingungen, wie sie während der Versuche vorlagen, eine Zuordnung der Fahrzeugposition bezüglich eines Fahrstreifens möglich ist.

Für weniger ideale Bedingungen im innerstädtischen Verkehr, bei schlechtem Wetter oder ähnlichem, wird diese Genauigkeit jedoch in den meisten Fällen nicht zu erreichen sein. Als alleinige Grundlage für sicherheitskritische Anwendungen oder andere Anwendungen, welche eine genau Positionsbestimmung benötigen, wird sich die Satellitenortung daher nicht eignen. Für Anwendungen mit hohen Positionsansprüchen wird daher eine Sensordatenfusion notwendig. Dies bedeutet, dass die Position unter Zuhilfenahme anderer Sensoren verbessert und referen-

ziert wird. Eine Möglichkeit ist dabei beispielsweise die Nutzung der heutzutage häufig verbauten Frontkamera, zur Bestimmung der Spur.

Bei den Laborversuchen wurden die Schwächen der GNSS-Ortung relativ schnell deutlich. Die Module wurden oftmals im Gebäude oder unterhalb eines Metallvordaches betrieben. Ersteres führte teilweise zu langen Zeiten bis zum *First Fix*. Der Betrieb unter dem Metalldach zeigt deutlich die Auswirkungen des Multipath Effects. Die ermittelte Position lag daher oft im gegenüberliegenden Gebäude. Positiv ist jedoch die Empfindlichkeit und Zeit bis zum *First Fix* aufgefallen. Auch innerhalb des Gebäudes konnten die Module nach einer Weile eine Position bestimmen, obwohl das GPS-Signal lediglich über ein Oberlicht ins Gebäudeinnere gelangen konnte.

6 Funktionsprototypen

Im Rahmen der Arbeit wurde sich auf die Programmierung von Funktionsprototypen konzentriert, die im Zusammenhang mit Einsatzfahrzeugen stehen. Während eines Einsatzes haben Fahrzeuge von Polizei, Feuerwehr, Notdienst oder anderen Einsatzkräften Sonderrechte. Paragraph § 35 der Straßenverkehrsordnung regelt die Befreiung von deren Vorschriften, wenn dies „[...] zur Erfüllung der hoheitlichen Aufgaben [...]“ (§ 35 Absatz 1 Satz 1 StVO) notwendig ist [28].

Einsatzkräfte können somit unter anderem die Höchstgeschwindigkeit überschreiten, rote Lichtsignalanlagen überqueren oder entgegen der Fahrtrichtung fahren, solange der Nutzen höher ist als das Risiko. Diese Fahrzeuge stellen daher eine besondere Herausforderung für den normalen Straßenverkehr dar. Besonders das Überqueren von roten Lichtsignalanlagen führt oft zu kritischen Situationen, da andere Verkehrsteilnehmer das akustische Signal überhören oder nicht zuordnen können und die blaue Rundumkennleuchte, umgangssprachlich Blaulicht, übersehen. Teilweise reagieren die Fahrer auch schlicht falsch auf die ungewohnte Situation. So kommt es immer wieder vor, dass Rettungskräfte selbst in einen Unfall geraten. Dies gefährdet nicht nur das Leben der Unfallbeteiligten, sondern auch der Personen, die eventuell am Einsatzort auf Hilfe warten.

In Zukunft ließen sich mithilfe der Car2X-Kommunikation alle Verkehrsteilnehmer in der Umgebung besser warnen. Dies könnte die Zahl der Gefahrensituationen reduzieren und zum Beispiel im Zusammenhang mit einer Vorzugssteuerung für Lichtsignalanlagen die Anfahrzeit verringern. Die Anfahrzeit ist die Zeit, die zwischen der Alarmierung und der Erstversorgung am Einsatzort vergeht. Sie stellt im Rettungswesen eine wichtige Größe dar, da sich diese Zeit besonders auf die Folgen des Ereignisses auswirkt. Besonders im Notdienst bedeutet eine geringere Anfahrzeit, dass die Überlebenschance eines Unfallopfers deutlich steigt.

Konkret wurden zwei Maßnahmen gewählt, die den Einsatzkräften von Nutzen sein sollen. Zum einen stellt dies eine Warnung der Fahrzeugführer im Cockpit des Fahrzeuges dar (siehe Kapitel 6.1) und zum anderen die Beschleunigung des Verkehrsflusses für das Einsatzfahrzeug durch eine Vorrangsteuerung einer Lichtsignalanlage (siehe Kapitel 6.2).

Theoretisch kann bei einem Fahrzeug im Rettungseinsatz auch die CAM-Botschaft mit angepasst werden, um zu signalisieren, dass es sich um ein Einsatzfahrzeug handelt. Die Funktion dafür war in der Software bereits vorhanden, führte jedoch immer wieder zu Abstürzen und wurde daher vorerst deaktiviert.

6.1 Einsatzfahrzeugwarnung

Bisher werden andere Verkehrsteilnehmer in Deutschland mittels blauer Rundumkennleuchte und Folgetonhorn, umgangssprachlich auch Martinshorn oder Sirene genannt, vor Einsatzfahrzeugen gewarnt. Beide haben jedoch in einigen Fällen erhebliche Nachteile, die ihre Wirkung begrenzen. Generell wird in Deutschland aufgrund der Lärmbelastung hauptsächlich das Blaulicht während der Fahrt eingesetzt. Das Martinshorn wird oft erst zusätzlich aktiviert, wenn Vorfahrtstraßen gequert werden oder eine rote Lichtsignalanlage überfahren werden muss sowie, wenn andere Verkehrsteilnehmer die freie Durchfahrt des Einsatzfahrzeuges behindern.

Die heutigen Warnungen haben vor allem dann ein Defizit, wenn der direkte Sichtkontakt nicht hergestellt werden kann. Ist das Einsatzfahrzeug nicht zu sehen, lässt sich oft schwer zuordnen, aus welcher Richtung das Signal kommt. Auch laute Musik im Fahrzeug kann zu einer verspäteten Wahrnehmung der akustischen Warnung führen. Bei Blaulicht ist es nachts oft schwer abzuschätzen, ob sich das Einsatzfahrzeug in Richtung des eigenen Fahrzeuges bewegt und damit relevant für den Fahrer ist oder nicht.

Für diese Fälle bietet sich eine direkte Unterstützung des Fahrers mittels Warnhinweisen und eventuell Verhaltensempfehlungen im Fahrerinformationssystem an. Dafür benötigt das Fahrzeug Daten, die beispielsweise über Car2X-Kommunikation zur Verfügung stehen.

Um dies zu bewerkstelligen, muss eine Möglichkeit geschaffen werden, spezielle Nachrichten vom Einsatzfahrzeug auszusenden und diese in anderen Fahrzeugen zu empfangen und zu interpretieren.

6.1.1 Funktion und Software im Einsatzfahrzeug

Bei eingeschaltetem Blaulicht muss das Car2X-Modul automatisch mit dem Versenden von DENM-Botschaften beginnen. Diese Botschaften enthalten einen speziellen Ursachencode („Cause Code“ und „Sub Cause

Code“) und alle weiteren in Kapitel 2.3.2 aufgeführten Informationen. Der entsprechende Ursachencode ist bereits in der Norm *ETSI TS 102 869-1* festgelegt. Für Einsatzfahrzeuge wurde der *Cause Code* 95 zugewiesen. Zur weiteren Unterteilung stehen drei *Sub Cause Codes* zur Verfügung. Eine Aufstellung und Erläuterung des *Sub Cause Codes* ist der Tabelle 6.1 zu entnehmen. Anhand der Bezeichnungen aus der Norm wurden Erläuterungen und Beispiele abgeleitet [29].

Sub Cause Code	Bezeichnung	Erläuterung/Beispiele
0	Nicht verfügbar	Keine weiteren Informationen
1	Rettungsfahrzeug in der Nähe	Behördliche Einsatzfahrzeuge / Krankenwagen, Polizei, Feuerwehr
2	Fahrzeug mit erhöhter Priorität in der Nähe	Nicht behördliche Fahrzeuge / Unfallforschung, Abschleppdienst

Tabelle 6.1: Sub Cause Codes für Einsatzfahrzeuge

Zum Auslösen der Funktion könnte das CAN-Signal genutzt werden, welches bei Aktivierung des Blaulichtes gesendet wird. Da im Rahmen der Diplomarbeit kein reales Einsatzfahrzeug zur Verfügung stand, wurde die Funktion mit einer Warnblinkanlage eines normalen Pkws nachgestellt. Als Versuchsträger diente ein Smart ForFour Baujahr 2001. Das Fahrzeug bietet den Vorteil, dass ein Großteil der CAN-Botschaften in vorangegangenen Projekten entschlüsselt worden sind und ein direkter Abgriff für den CAN-Bus zur Verfügung steht.

Die Information über die Warnblinkanlage ist in der CAN-Botschaft für die Lichtfunktionen enthalten. Diese trägt im Smart die ID 423. Die nachfolgende Tabelle 6.2 zeigt die über diese Nachricht gesteuerten Funktionen, soweit diese bekannt sind.

Signal	Startbit	Länge	Type
Standlicht	2	1	bool
Nebelschlusslicht	4	1	bool
Blinkleuchte rechts	8	1	bool
Blinkleuchte links	9	1	bool
Fernlicht	10	1	bool

Tabelle 6.2: Signale der CAN-Botschaft ID 423

Die beiden Bit 8 und 9 aktivieren die rechten beziehungsweise linken Blinkleuchten. Die Leuchten werden direkt über diese Botschaft angesteu-

ert, sodass die Bit während des Blinkvorgangs periodisch zwischen 0 (Blinkleuchte deaktiviert) und 1 (Blinkleuchte aktiviert) wechseln. Im Fall der aktivierten Warnblinkanlage stehen somit beide Bit immer gleichzeitig auf 1 oder 0.

Dieses Verhalten lässt sich nun über den CAN-Thread des Cohda-Moduls auswerten. Zu diesem Zweck wartet der Thread auf die entsprechende CAN-Botschaft. Beim Empfang einer Nachricht mit der ID 423 wird geprüft, ob die Bit 8 und 9 gesetzt, also 1 sind. Ist dies der Fall wird jedes mal ein Timer zurückgesetzt und eine Nachricht zur Aktivierung der Car2X-Funktion an den ITS-Steuer-Thread gesendet.

Werden Botschaften empfangen, bei denen mindestens eines der beiden Bit nicht gesetzt wurde ist die jeweilige Blinkleuchte deaktiviert und der Timer zählt weiter hoch. Für den Timer wird eine Grenze festgelegt, die größer ist, als die periodische Ausschaltzeit des Blinkvorgangs. Überschreitet der Timer diese Grenze gilt die Warnblinkanlage als inaktiv und es wird eine Nachricht zur Deaktivierung der EVW-Warnung an den ITS-Steuer-Thread versandt.

Dem ITS-Steuer-Thread ist bereits aus der Konfigurationsdatei bekannt, dass es sich um ein Spezialfahrzeug handelt. Erreicht ihn nun die Botschaft zur Aktivierung aus dem CAN-Thread, so wird der Wert für das aktivierte Blaulicht ebenfalls auf 1 gesetzt und der Thread aktiviert die Funktion zum Versenden der DENM-Botschaft mit dem *Cause Code* 95 und *Sub Cause Code* 1.

Im ITS-Sende-Thread wird die Botschaft mit den entsprechenden Informationen erstellt. Als Gültigkeitsdauer wurden 3 s und als Relevanzbereich weniger als 500 m gewählt. Der Relevanzbereich ist für die eigentliche Funktion vermutlich bereits zu groß, wurde jedoch für die Sicherstellung der Versuche so genutzt. Das Hopping der Nachricht wurde auf drei begrenzt. Gerade in Gegenden mit eng stehender Bebauung oder sonstigen signalabschirmenden Hindernissen hilft dies, alle Fahrzeuge im Relevanzbereich warnen zu können, auch wenn keine direkte WLAN-Verbindung besteht.

In Abbildung 6.1 wird der Programmablauf beim ersten Eintreffen einer Warnblink-CAN-Botschaft gezeigt. Volllinien stellen Callbacks, Punkt-Strich-Linien das interne Nachrichtensystem und Punkt-Linien API-Zugriffe dar.

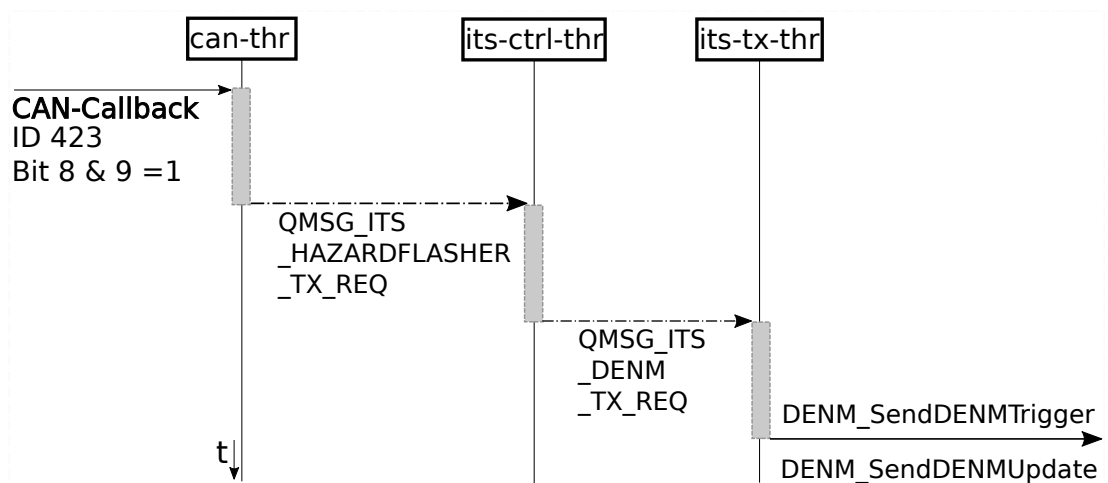


Abbildung 6.1: Programmablauf EVW-Sender

6.1.2 Funktion und Software im Empfängerfahrzeug

Verarbeitung im Car2X-Modul

Empfängt ein normales Fahrzeug die DENM-Botschaft mit *Cause Code* 95 und *Sub Cause Code* 1 und dieses befindet sich innerhalb des Relevanzbereich, so wird diese im ITS-Empfänger-Thread verarbeitet. Dieser übergibt die eigenen Bewegungsdaten und die Daten aus der DENM-Botschaft an eine ausgelagerte und eigens entwickelte Funktion.

In dieser wird als Erstes der Azimut zum Einsatzfahrzeug Az aus den Positionsdaten beider Fahrzeuge ermittelt. Dies geschieht mit Formel 3.7 aus Abschnitt 3.4.4. Ausgegeben wird die Richtungsangabe dem Kompass entsprechend mit Nord gleich 0° . Da so jedoch der Bezug zur eigenen Fahrzeugrichtung fehlt, ist eine Bewertung, ob sich das andere Fahrzeug vor oder hinter dem eigenen befindet, nicht möglich. Daher wird über den aktuellen Kurswinkel ω_{Eigen} auf eine Gradangabe von -180° bis 180° umgerechnet. Befindet sich das Einsatzfahrzeug in Fahrtrichtung links, sind die Gradangaben negativ. (siehe Abbildung 6.2)

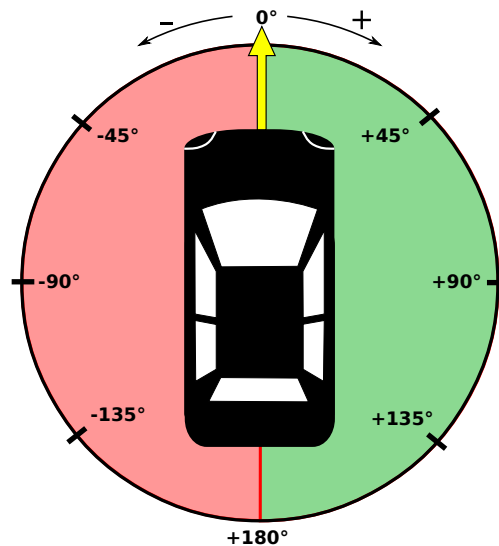


Abbildung 6.2: Winkel in Bezug auf Fahrtrichtung

Für die Berechnung des Positionswinkels in Bezug auf die eigene Fahrtrichtung die folgenden drei leicht abgewandelte Formeln notwendig.

$$\alpha_{Pos} = Az - \omega_{Eigen} + 360^\circ \quad \text{für} \quad Az - \omega_{Eigen} < -180^\circ \quad (6.1)$$

$$\alpha_{Pos} = Az - \omega_{Eigen} \quad \text{für} \quad -180 \leq Az - \omega_{Eigen} \leq 180^\circ \quad (6.2)$$

$$\alpha_{Pos} = Az - \omega_{Eigen} - 360^\circ \quad \text{für} \quad Az - \omega_{Eigen} > 180^\circ \quad (6.3)$$

Im Anschluss berechnet die Software aus dem Kurswinkel des Einsatzfahrzeuges und des eigenen Fahrzeuges den Angriffswinkel $\omega_{Angriff}$. Er stellt den Winkel dar, in dem die Fahrzeuge aufeinandertreffen würden, wenn sie sich begegnen würden. Dieser wird wieder auf das Richtungsmodell in Abbildung 6.2 bezogen. Aus diesem Grund muss man auch in dieser Rechnung eine Fallunterscheidung vornehmen. Je nachdem ob der Kurswinkel des Einsatzfahrzeuges (Gegnerfahrzeug) ω_{Gegner} größer oder kleiner als der Eigenkurswinkel ω_{Eigen} ist, wird entweder mit 180° subtrahiert oder addiert. Damit ergeben sich die Formeln 6.4 und 6.5 für den Angriffswinkel.

$$\omega_{Angriff} = \omega_{Gegner} - \omega_{Eigen} + 180^\circ \quad \text{für} \quad \omega_{Gegner} > \omega_{Eigen} \quad (6.4)$$

$$\omega_{Angriff} = \omega_{Gegner} - \omega_{Eigen} - 180^\circ \quad \text{für} \quad \omega_{Gegner} < \omega_{Eigen} \quad (6.5)$$

Damit sind die Position relativ zum eigenen Fahrzeug und der Angriffswinkel bekannt. Diese beiden Größen reichen bereits für eine grundlegende Relevanzbetrachtung aus. Als relevant für den Fahrer wurden Situationen eingeschätzt, bei denen sich das Rettungsfahrzeug in etwa

auf das gewarnte Fahrzeug zu bewegt. Beispielsweise ist ein Einsatzfahrzeug, das sich in Fahrtrichtung vorn rechts befindet ($0^\circ < \alpha_{\text{Pos}} < 90^\circ$) und einen Angriffswinkel ω_{Angriff} von ebenfalls 0 bis 90° besitzt vermutlich relevant für den Fahrer, das sich das Fahrzeug auf ihn zubewegt und somit potentiell eine mögliche Gefährdung beziehungsweise Behinderung darstellt. Ein Einsatzfahrzeug das sich hinter dem gewarnten Fahrzeug auf der linken Seite ($-180^\circ < \alpha_{\text{Pos}} < -90^\circ$) befindet und einem Angriffswinkel von 0 bis 90° besitzt, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht relevant, da es sich vom Fahrzeug entfernt. (vergleiche Abbildung 6.3)

Da jedoch nicht garantiert werden kann, dass alle relevanten Fälle abgedeckt werden, ist die in der Diplomarbeit vorgenommene Relevanzbetrachtung als zusätzliches Element zur Warnung des Fahrers zu sehen. So wäre es beispielsweise denkbar, den Fahrer durch akustische oder optische Signale noch einmal zusätzlich auf die Situation aufmerksam zu machen.

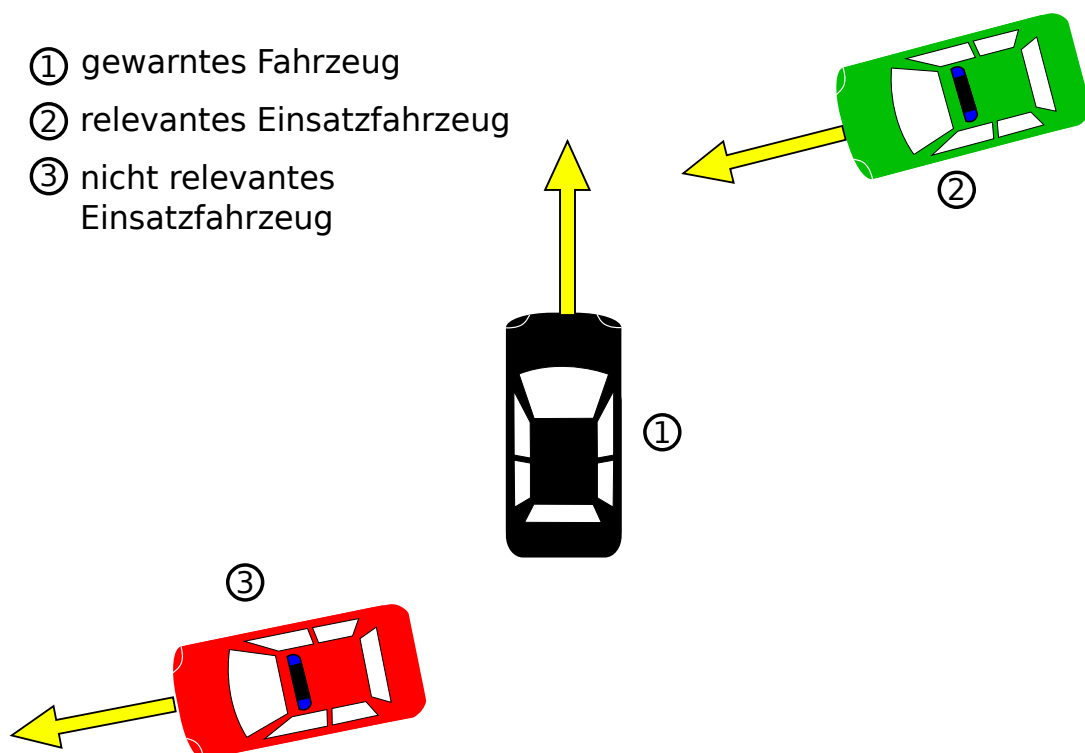


Abbildung 6.3: Beispiel für Relevanzbetrachtung

Ergänzend kann es sinnvoll sein, die Entfernung zum anderen Fahrzeug zu kennen. Aus diesem Grund wurde diese ebenfalls nach Formel in Abschnitt 3.4.3 berechnet.

An dieser Stelle wäre es möglich, die drei Werte für Entfernung, Angriffswinkel und Positionswinkel an ein anderes Steuergerät zu überge-

ben und die weitere Auswertung diesem zu überlassen. Für die Diplomarbeit wurde jedoch die Relevanzbetrachtung, wie oben beschrieben, implementiert. Dazu wurde zuerst das Fahrzeugumfeld in Bereiche unterteilt. Vor dem Fahrzeug wurden die fünf Winkelbereiche „links“, „vorn links“, „vorn“, „vorn rechts“ und „rechts“ deklariert. Der Bereich hinter dem Fahrzeug wurde in die drei relevanten Winkelbereiche „hinten links“, „hinten“ und „hinten rechts“ gegliedert. Diese werden numerischen Werte zwischen 0 und 8 zugewiesen, wie sie in der Header-Datei hinterlegt sind.

All diese Unterteilungen decken einen bestimmten Winkelbereich um das Fahrzeug herum ab. Die Grenzwerte für diese Bereiche wurden in der EVW-Funktion leicht zugänglich hinterlegt, sodass bei der Applikation die Warnbereiche schnell angepasst werden können. Für die Versuche der Diplomarbeit wurden die Werte entsprechend der Tabelle 6.3 gewählt.

Bereichsname	Winkelbereich [°]
vorn	-30 bis 30
vorn rechts	30 bis 60
rechts	60 bis 120
hinten rechts	120 bis 160
hinten	-160 bis -180 & 160 bis 180
hinten links	-120 bis -160
links	-120 bis -60
vorn links	-60 bis -30

Tabelle 6.3: Winkelbereiche für Relevanzbetrachtung

Die Winkel beziehen sich letztendlich immer auf den Angriffswinkel und nicht auf den Positionswinkel, sodass ein Einsatzfahrzeug, welches direkt vor dem Fahrzeug quert, als von links kommend deklariert wird.

Die Angriffswinkel sind nur dann relevant, wenn sich das Fahrzeug in der entsprechenden Richtung befindet. Für die Bereiche „vorn“, „vorn rechts“, „rechts“ und „hinten rechts“ ist dies in Anlage 6.1 dargestellt.

Nach diesen Berechnungen wird eine interne Botschaft an den ITS-Steuer-Thread gesendet, die zur Realisierung der Ampelphasenanpassung verwendet wird. Nähere Details dazu finden sich in Abschnitt 6.2.

Letztlich werden die Werte für den Positionswinkel, die Richtung, aus der das Fahrzeug kommt, und die Distanz zum Einsatzfahrzeug mittels CAN-Botschaften versendet. Es werden vier Nachrichten mit ID von 681

bis 684 übertragen. Diese beinhalten zusätzliche Informationen wie Station-ID, Position, Ereignisrichtung und Ursachencode.

In Abbildung 6.4 wird der Programmablauf beim ersten Eintreffen einer Warnblink-CAN-Botschaft gezeigt. Volllinien stellen Callbacks, Punkt-Strich-Linien das interne Nachrichtensystem und Punkt-Linien API-Zugriffe dar. Ausgelagerte Funktionen sind grau hinterlegt. Die Funktionsaufrufe dazu werden als Strich-Linie dargestellt.

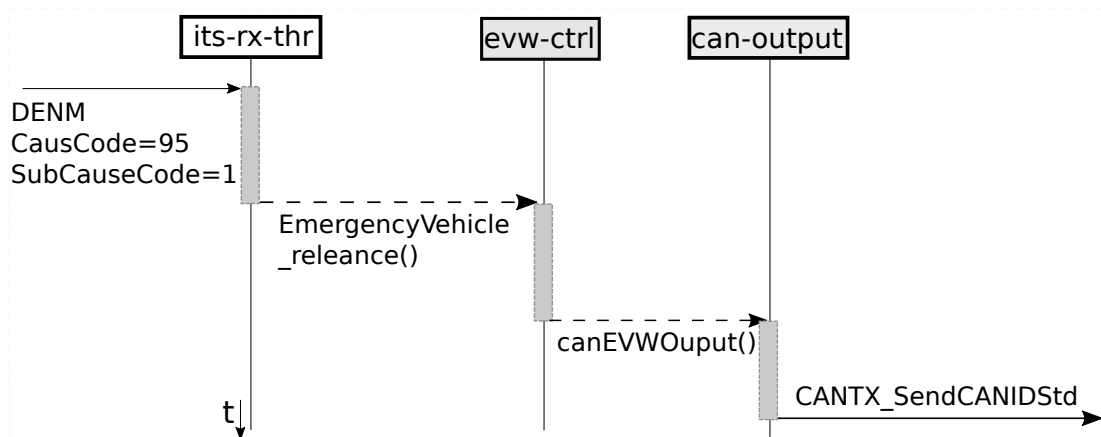


Abbildung 6.4: Programmablauf EVW-Empfänger

Visualisierung im Fahrzeug

Zur Zeit gibt es keine direkte Integration in das Fahrzeuginformationssystem. Für die Visualisierung der Car2X-Funktionen wurde ein separater Computer genutzt. Dieser Computer wurde mittels *CANCase* und CAN-Bus an die Car2X-Module von *Cohda* gekoppelt. Die vom Modul ausgegebenen CAN-Daten werden im Computer eingelesen und in einem Programm visualisiert.

Das Programm wurde von Erik Unger geschrieben und stellt eine 3D-Umgebung dar. Die 3D-Visualisierung wurde auf Basis von OpenGL erstellt. Sie zeigt die eigene Fahrzeugposition mit einem Modell des eigenen Fahrzeuges sowie einen Pfeil mit dessen Fahrtrichtung. Andere ITS-Stationen werden ebenfalls als Pfeil an den entsprechenden Positionen dargestellt. Wird eine DENM-Botschaft empfangen, so wird dies, soweit vorhanden, mit einem kleinen Symbol an der Position dargestellt. Alternativ wird nur ein einfacher Text eingeblendet. SPaT-Botschaften werden nur als Symbol am Bildschirmrand dargestellt, da bisher die Verbindung mit den MAP-Botschaften noch nicht besteht.

Es wurden sich ebenfalls Gedanken darüber gemacht, wie eine direkte Integration in das Fahrerinformationssystem aussehen könnte. Der erste

Entwurf sah einen Segmentring zur Anzeige der Richtung des Einsatzfahrzeuges vor sowie eine 3D-Darstellung der Fahrtrichtung des Einsatzfahrzeuges und ein Warnsymbol im Kombiinstrument. Dazu wurde ein Mockup angefertigt, welches in Abbildung 6.5 zu sehen ist.



Abbildung 6.5: Mockup EVW-Warnung 3D

Diese Version ist jedoch leicht misszuverstehen, wie auch eine kurze Umfrage innerhalb eines kleinen Personenkreises ergab. Oft wurde der Richtungsanzeiger im statischen Bild für eine Abstandsanzeige gehalten.

Aus diesem Grund wurde der Segmentring durch einen einfachen Pfeil ersetzt, die eher unnötige 3D-Darstellung der Fahrtrichtung des Einsatzfahrzeuges entfernt und die Warnung ausschließlich im Kombiinstrument angezeigt. Da es bei den Bildtafeln des deutschen Straßenverkehrs kein Achtungsschild für Einsatzfahrzeuge gibt, wurden zwei mögliche Darstellungen selbst entworfen. Die beiden Entwürfe kann man in Anlage 6.2 in den Abbildungen 8 und 9 sehen. Das erste Symbol stellt ein neutral gehaltenes Fahrzeug mit Blaulicht dar und das zweite nur ein Blaulicht.

Generell ist anzumerken, dass der Versuchsträger nicht optimal für eine solche Warnung im Kombiinstrument geeignet ist, da die Displayfläche, auf der die Warnung angezeigt werden kann relativ klein ist und dadurch Symbole schwerer erkennbar sind. Modernere Fahrzeuge besitzen oft größere Farbdisplays zwischen Drehzahlmesser und Tachometer oder setzten direkt auf ein digitales Kombiinstrument mit virtuellem Drehzahlmesser

und Tachometer. Dadurch wird es möglich, bei diesen Fahrzeugen Warnungen größer einblenden zu können.

Weiterhin wäre es möglich, wie auf dem separaten Monitor, die Warnung im Navigationsgerät des Fahrzeuges einzublenden. Dabei muss jedoch untersucht werden, ob dies eine zu große Ablenkung für den Fahrer darstellt und ob er die Situation schnell genug erfassen kann. Zur Ausgestaltung einer solchen Warnung müssten daher weitere Versuche und Studien mit größerer und repräsentativerer Personengruppen durchgeführt werden.

6.2 Ampelphasenanpassung für Einsatzfahrzeuge

Eine Ansteuerung der Ampel kann je nach Situation einen großen Zeitvorteil für ein Einsatzfahrzeug bedeuten. Schon heute werden beispielsweise im öffentlichen Personennahverkehr Vorrangschaltungen genutzt, um den Fahrplan einzuhalten.

Je nach Situation kann es dabei sinnvoll sein, die Schaltung unterschiedlich zu manipulieren. Bei Baustellenampeln wäre beispielsweise eine Rotschaltung beider Ampeln denkbar, damit sich bei Durchfahrt des Einsatzfahrzeuges kein anderes Fahrzeug innerhalb der Baustelle befindet. Bei mehrspurigen Kreuzungen mit Grünstreifen zwischen den Fahrtrichtungen könnte es hingegen sinnvoll sein, die Lichtsignalanlage aus Richtung des Einsatzfahrzeuges grün zu schalten. Dies würde ermöglichen, dass etwaige an der Lichtsignalanlage stehende Fahrzeuge den Kreuzungsbereich bereits verlassen haben, wenn das Einsatzfahrzeug die Kreuzung erreicht.

6.2.1 Grundausslegung der Ampel

Für den Funktionsprototypen im Rahmen der Diplomarbeit wurde sich für eine Kombination aus den beiden oben stehenden Möglichkeiten entschieden. Dabei wurde die Lichtsignalanlage auf einen sehr simplen Fall vereinfacht. Simuliert werden sollte eine Baustellenampel mit zwei Ampeln, bei der jene Ampel auf Grün schaltet, aus der das Einsatzfahrzeug kommt.

In Deutschland hat jede Lichtsignalanlage für Fahrzeuge vier Phasen. Eine Rot-Phase, eine Grün-Phase und jeweils eine Gelb-Phase zwischen

der Rot- und Grün-Phase. Der gesamte Ampelzyklus beider Lichtsignalanlagen ist identisch, jedoch zeitlich versetzt.

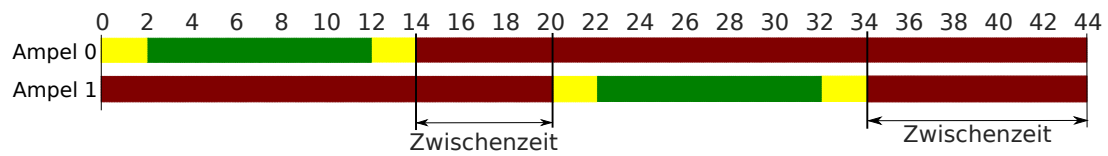


Abbildung 6.6: Signalzeitplan

Es wurde eine Zeit von zwei Sekunden für die Gelb-Phasen gewählt. Die Rot-Phase selbst dauert 30 Sekunden und die Grün-Phase zehn Sekunden. Die Phase, in der beide Ampeln auf Rot stehen, nennt man Zwischenzeit. Sie dient dazu, dass alle Fahrzeuge den Kreuzungs- oder Baustellenbereich räumen. In diesem Fall wurde sie asynchron ausgelegt. Die Fahrtrichtung von Ampel 1 hat daher mehr Zeit zum Räumen der Baustelle. Dies soll den zeitlichen Mehraufwand ausgleichen, den Fahrer haben, um von ihrer blockierten Spur auf die freie Spur und zurück zu wechseln.

6.2.2 Funktion der Ampelphasensteuerung

Im Normalfall läuft die SPaT-Generierung, wenn aktiviert, innerhalb des its-tx-thr-Threads kontinuierlich. Diese Funktion wurde mit Release 12 hinzugefügt. Letztlich aktualisiert die Funktion bei jedem Programmzyklus die Zeit bis zur nächsten Phase. Ist die Restlaufzeit abgelaufen, wird auf die nächste Phase gewechselt und die Zeit dieser Phase als Restlaufzeit gesetzt.

Wie oft eine SPaT-Botschaft generiert und versendet wird, kann innerhalb der Konfigurationsdatei festgelegt werden. Es wurde eine Wiederholrate von 2 Hz als ausreichend angenommen, da etwaige Zwischenzeiten auch vom Empfänger selbst berechnet werden könnten und so der Datenverkehr reduziert wird.

Für die Vorrangschaltung einer Ampel wurde die Richtungserkennung aus Kapitel 6.1 genutzt. Die Position und Richtung der Baustelle wurde über die Konfigurationsdatei festgelegt. Mittels Angabe der Event-Richtung in der DENM-Botschaft für die Baustellenwarnung wurde definiert, welche Lichtsignalanlage die Kennung 0 und welche die Kennung 1 erhält. Ampel 0 gilt für die Lichtsignalanlage in Event-Richtung und Ampel 1 entgegen der Event-Richtung.

Wird von der RSU eine Einsatzfahrzeugwarnung empfangen, erfolgt eine Prüfung, ob sich das Einsatzfahrzeug von „hinten“ (in Event-Richtung) oder „vorn“ (entgegen der Event-Richtung) der Baustelle nähert. Je nachdem wird die jeweilige Ampel priorisiert.

In Abbildung 6.7 wird der Programmablauf für die Ampelphasen-anpassung gezeigt. Volllinien stellen Callbacks, Punkt-Strich-Linien das interne Nachrichtensystem und Punkt-Linien API-Zugriffe dar. Ausgelagerte Funktionen sind grau hinterlegt. Die Funktionsaufrufe dazu werden als Strich-Linie dargestellt.

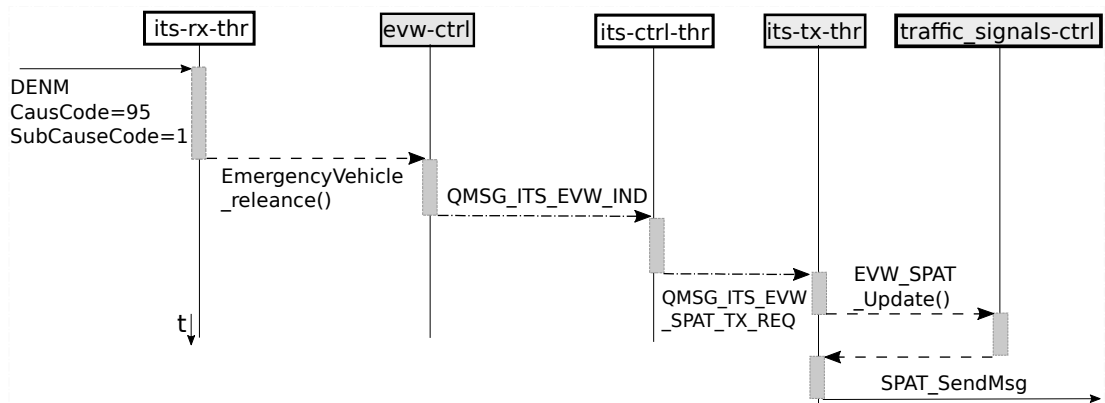


Abbildung 6.7: Ampelphasenanpassung bei EVW

Es sind jedoch zahlreiche verschiedene Fälle zu beachten. Je nachdem welche Lichtsignalanlage sich in welcher Phase befindet, muss die Ansteuerung unterschiedlich durchgeführt werden. Wenn die Ampel der Gegenrichtung beispielsweise gerade in der Grün-Phase ist, kann nicht einfach sofort auf Rot geschaltet werden und die andere Ampel auf Grün. In diesem Fall muss die Zwischenzeit zur Räumung des Baustellenbereichs eingehalten werden. Dieser Fall wird in Anlage 6.3 Abbildung 10 gezeigt.

Das Diagramm untergliedert sich in zwei Bereiche. Im oberen Teil wird die Ampelphase der jeweiligen Lichtsignalanlage über die Zeit dargestellt. Im unteren Bereich sieht man den Verlauf der Restzeit bis zur nächsten Phase. Der gelb hinterlegte Bereich ist die Zeit, in der über den CAN-Bus die CAN-Botschaft für die virtuelle Rundumkennleuchte an die, als Rettungsfahrzeug gestartet OBU-Station gesendet wurde. Die schwarze Strichlinie stellt die Zeit dar, die von der Deaktivierung der CAN-Botschaft bis zur Deaktivierung der *Emergency Vehicle Warning*, kurz EVW, vergeht. Der Grund für diesen Zeitverzug wurde in Kapitel 6.1.1 beschrieben.

Ampel 0 stellt in allen folgenden Diagrammen die Lichtsignalanlage dar, aus deren Richtung das Einsatzfahrzeug kommt. Sie ist also immer die priorisierte Ampel.

Im unteren Bereich kann man sehen, dass direkt mit dem Empfang der ersten EVW-Botschaft die Grün-Phase der Gegenrichtung (Ampel 1) beendet und auf Gelb geschaltet wird. Die Restlaufzeit von Ampel 1 wird auf die normale Zeit einer Gelb-Phase gesetzt. Die Restlaufzeit der Rot-Phase von Ampel 0 wird auf die Summe der Zwischenzeit und der Zeit der Gelb-Phase gesetzt. Anschließend laufen die Signalphasen wie gehabt weiter.

Abbildung 11 in Anlage 6.3 zeigt den einfachsten Fall der Ampelsteuerung. Wenn die Lichtsignalanlage in Fahrtrichtung gerade Grün ist, muss kein Phasenwechsel durchgeführt werden. Die Ampel 0 wird so lange auf Grün gehalten, bis das Rettungsfahrzeug passiert hat. Das sieht man daran, dass beide Restlaufzeiten im Bereich der EVW nicht weiter sinken.

Befindet sich die Ampel 0 gerade in der Gelb-Phase zum Wechsel von Grün zu Rot, wird die Gelb-Phase unterbrochen und die Lichtsignalanlage wieder auf Grün geschaltet. Zu sehen ist dies in Anlage 6.3 Abbildung 12. In diesem Fall zeigen sich jedoch Probleme, die im realen Verkehr auftreten könnten. Es ist gut möglich, dass die Fahrer vom Wechsel zurück zu Grün verwirrt werden. Zu Auffahrunfällen kann es dabei kommen, wenn der vordere Fahrer nicht erfasst, dass die Ampel wieder auf Grün geschaltet hat, der Fahrer dahinter jedoch wieder beschleunigt. Das gleiche Problem tritt umgekehrt auf, wenn während der Gelb-Phase zu Grün plötzlich wieder auf Rot geschaltet wird

Für die letzten beiden Fälle sowie für die Umschaltung am Anfang einer Ampelphase gilt daher, dass hier eventuell eine solch aggressive Vorrangsteuerung unter Umständen mehr schadet als nützt. Diesbezüglich wären simulierte Stadtfahrten mit einer Vielzahl an Probanden sinnvoll, um das Gefahrenpotenzial abschätzen zu können.

6.3 Präsentation bestimmter Car2X-Funktionen

Der bisher umfangreichste Versuch mit den meisten eigenen Car2X-Stationen wurde bei einer Vorführung im Rahmen eines Ministerbesuchs realisiert. Im Firmengelände der Fahrzeugsystemdaten GmbH wurde auf dem Dach des Firmengebäudes eine RSU installiert. Diese war über den

CAN-Anschluss mit einem Messrechner im Foyer verbunden. Darauf wurde die 3D-Visualisierung genutzt, um alle Stationen in der Umgebung darzustellen.

Insgesamt wurden sechs weitere Car2X-Stationen eingesetzt. Zwei waren in einem Passat 3C als normale OBU installiert. Als OBU wurden weiterhin zwei Smart Fortwo genutzt. Ein dritter Smart wurde als Rettungsfahrzeug mit gelber Rundumkennleuchte ausgestattet und versendete DENM-Botschaften zur Rettungsfahrzeugwarnung. Die letzte Station wurde in einem stationären Smart Forfour integriert und sollte die DENM-Botschaft eines Pannenfahrzeuges senden. In Vortests war es aufgrund dieser Botschaft jedoch zu regelmäßigen Abstürzen anderer Stationen gekommen. Aus diesem Grund wurde die Funktion deaktiviert.

Die Systeme liefen während der gesamten Zeit stabil. Auch der Ein- und Wiederaustritt aus den Empfangsbereichen der Stationen stellte keine Probleme dar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Diplomarbeit konnten die Car2X-Module von *Cohda Wireless* erfolgreich in Betrieb genommen und getestet werden. Die Positionstests haben gezeigt, dass die mitgelieferten GPS-Antennen insgesamt hochwertig sind. Sie haben jedoch mit den allgemeinen Problemen der GNSS-Ortung zu kämpfen. Es wäre daher sinnvoll, in zukünftigen Projekten zu versuchen, andere Sensorinformationen zu integrieren.

Die Versuche zur Bestimmung der Positionsgenauigkeit wiesen noch relativ große Ungenauigkeiten auf. Zwar sollte mithilfe des Laserscanners der menschliche Fehler bei den Versuchen herausfilterbar sein, doch die Auswertung der Laserdaten selbst bietet einige Herausforderungen. Generell sind die Versuche nicht repräsentativ, wenn es um den Einsatz im Car2X-Bereich geht. Ideale Bedingungen wie auf dem *DEKRA Test Oval* in Klettwitz gibt es nur selten. Oftmals wird das GPS-Signal von umliegenden Objekten oder atmosphärischen Bedingungen gestört. Es wäre daher sinnvoll, die Ortung auch im urbanen Umfeld zu testen.

Es konnten eigene Funktionen für die Einsatzfahrzeugwarnung und die Ampelphasensteuerung umgesetzt werden. Beide Funktionen bieten noch viel Potential für Verbesserungen und Erweiterungen. Für zukünftige Ent-

wicklungen wurde jedoch eine solide Grundlage gelegt. Wichtiges Element dabei ist die Steuerung von Funktionen über CAN-Botschaften.

Zum Teil kam es bei den Versuchen noch zu Abstürzen der Entwicklermodule. Es konnten jedoch bisher mit jedem neuen Firmware-Release von Cohda positive Veränderungen festgestellt werden. Eine Portierung der Funktionsprototypen auf das neuere Release wäre also anzustreben.

Quellverzeichnis

- [1] Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz, Christina Singe:
Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort; : Wiesbaden, 2015
- [2] Car-2-Car-Consortium:
CAR 2 CAR Related Projects (Status June 2014); Veröffentlichung vom Juni 2014
<https://www.car-2-car.org/index.php?id=6>, Abrufdatum:05.11.2015
- [3] Edwin Dmello, Cohda Wireless:
Handbuch Fahrerassistenzsysteme Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort; Springer Vieweg: Wiesbaden, 2015
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung:
Eurokorridor - Cooperative ITS Corridor Joint deployment; Veröffentlichung vom 07.06.2013
, Abrufdatum:23.11.2015
- [5] CAR 2 CAR Communication Consortium:
CAR 2 CAR Communication Consortium - Manifesto - Overview of the C2C-CC System v1.1; Veröffentlichung vom 28.08.2007
https://www.car-2-car.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1449694435&hash=0cc6249f-de5a99d3596ffcb73c97d874bdce868e&file=fileadmin/downloads/C2C-CC_manifesto_v1.1.pdf, Abrufdatum:08.12.2015
- [6] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, 2011
- [7] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service, 2010
- [8] o.A:
Технология Car-to-X communication ; Veröffentlichung vom o.A.
, Abrufdatum:09.12.2015

- [9] Torlaf Trautmann, Vorlesungscript Fzg.-Kommunikationssysteme, 2015
- [10] Werner Zimmermann, Ralf Schmidgall:
Bussysteme in der Fahrzeugtechnik - Protokolle, Standards und Softwarearchitektur; Springer Vieweg: Wiesbaden, 2014
- 11: Toralf Trautmann, Vorlesungscript Mechatronische Grundlagen, 2013
- [12] Hans Dodel, Dieter Häupler:
Satellitennavigation; Springer : Berlin, Heidelberg u.a., 2010
- [13] Tobias Schüttler:
Satellitennavigation - Wie sie funktioniert und wie sie unseren Alltag beeinflusst; Springer Vieweg: Berlin, Heidelberg, 2014
- [14] Enemy:
Gnss bandwidth; Veröffentlichung vom 19.06.2008
https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AGnss_bandwidth.svg,
Abrufdatum:23.11.2015
- [15] Recommendation ITU-R V.431-7: Nomenclature of the Frequency and Wavelength Bands Used in Telecommunications, 2000
- [16] Geo Swan:
Comparison satellite navigation orbits; Veröffentlichung vom 25.10.2011
, Abrufdatum:25.11.2015
- [17] olin O'Flynn:
Example of Geometric Dilution Of Precision (GDOP) for simple Triangulation; Veröffentlichung vom 13.11.2011
, Abrufdatum:05.12.2015
- [18] Tissa, M0tty:
GDOP bad; Veröffentlichung vom 25.08.2012
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GDOP_bad.svg,
Abrufdatum:05.12.2015
- [19] Tissa, M0tty:
GDOP good; Veröffentlichung vom 25.08.2012
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GDOP_good.svg,
Abrufdatum:05.12.2015

- [20] Trex2001:
GPS Refraction; Veröffentlichung vom 14.02.2011
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GPS_Refraction.svg, Abrufdatum:05.12.2015
- [21] Pearson Scott Foresman, Gregors:
Latitude lines; Veröffentlichung vom 27.03.2011
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Latitude_lines.svg, Abrufdatum:06.12.2015
- [22] Pearson Scott Foresman:
Longitude (PSF); Veröffentlichung vom 04.12.2007
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Longitude_%28PSF%29.png,
Abrufdatum:06.12.2015
- [23] Wikipedia-Autoren:
Geographische Breite; Veröffentlichung vom 15.11.2015
https://de.wikipedia.org/wiki/Geographische_Breite,
Abrufdatum:06.12.2015
- [24] Franz Josef Gruber, Rainer Joeckel:
Formelsammlung für das Vermessungswesen; : Wiesbaden,
- 25: Edwin Dmello, Overview of the MK5 Carrier Board, 2014
- [26] Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch –Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 –Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N , 2009
- 27: Prof. Dr.-Ing. J. Schneider, Skript Straßenverkehrsanlagen - LG Straßenentwurf, 2014
- [28] Straßenverkehrs-Ordnung vom 6. März 2013 (BGBl. I S. 367), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 15.September 2015 (BGBl. I S. 1573) geändert worden ist
- [29] Intelligent Transport Systems (ITS);Testing;Conformance test specifications forDecentralized Environmental Notification Messages (DENM);Part 1: Test requirements and Protocol ImplementationConformance Statement (PICS) proforma, 2014

- [30] o. A. National Coordination Office:
Data From the First Week Without Selective Availability ; Veröffentlichung
vom February 17, 2012
<http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/data/>,
Abrufdatum:19.11.2015
- [31] Zou Weirong:
Beidou satellite navigation system to cover whole world in 2020; Veröf-
fentlichung vom 2010.05.20
http://eng.chinamil.com.cn/news-channels/china-military-news/2010-05/20/content_4222569.htm, Abrufdatum:24.11.2015
- [32] o. A.:
One third of Galileo constellation now in orbit ; Veröffentlichung vom
11.09.2015
[http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom/cf/itemde-
tail.cfm?item_id=8434&lang=en&tpa_id=0&title=-One-third-of-Galileo-
constellation-now-in-orbit](http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item_id=8434&lang=en&tpa_id=0&title=-One-third-of-Galileo-constellation-now-in-orbit), Abrufdatum:20.11.2015
- [33] o. A.:
The history of Galileo; Veröffentlichung vom 12.11.2015
http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/history/index_en.htm,
Abrufdatum:20.11.2015

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Professor Toralf Trautmann bedanken, der mir ermöglicht hat, diese Arbeit zu schreiben und mir durch die Aufgabenstellungen, einen guten Leitfaden geboten hat.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Erik Unger, der mir als Betreuer zur Seite gestanden hat. Mit seinem fundierten Wissen in Matlab und CANalyzer konnte er mir stets bei Problemen helfen. Auch die von ihm programmierte grafische Oberfläche für die Darstellung von Car2X-Daten hätte es ohne ihn so nicht gegeben. Außerdem hat er mich bei allen Versuchen unterstützt.

Auch meinem Kommilitone Dihn Hai Phuc möchte ich für die gute Zusammenarbeit danken. Insbesondere beim Einstieg in das Thema Car2X und der Inbetriebnahme der Module war der Gedankenaustausch mit ihm von großem Vorteil.

Den beiden Informatikern Markus Degenkolbe und Peter Gabriel möchte ich ebenfalls für ihre Hilfe bei Problemen mit der C-Programmierung danken.

Dem Werkstattleiter Peter Fuhrmann möchte ich für den Bau der Halterung zur die Integration des CarPC und des Car2X-Moduls in das Versuchsfahrzeug danken.

Meinen Freunden gilt ebenfalls mein Dank, da sie mich bei einer kleinen Studie zur Visualisierung der Rettungsfahrzeugwarnung mit hilfreichen Rückmeldungen gegeben haben.

Zuletzt gilt ein besonderer Dank auch meinem Bruder Carsten Pietzsch und seiner Freundin Sarah Meuters, die sich der sprachlichen Korrektur dieser Arbeit angenommen haben.

Eidesstattliche Erklärung

Das vorliegende Dokument wurde an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann angefertigt.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema

„Entwicklung von Funktionsprototypen für vernetzte Fahrzeuge“

selbstständig und ohne Benutzung anderer Quellen und Hilfsmittel als angegeben angefertigt habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ferner gestatte ich der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, die vorliegende Diplomarbeit unter Beachtung insbesondere urheber-, datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

.....
Ort, Datum

.....
Name, Vorname

Anlagenverzeichnis

Anlage 3.1 Geschichte der Satellitenortung	81
Anlage 3.2 Prinzip GNSS-Ortung	83
Anlage 5.1 Übersicht Messergebnisse	84
Anlage 5.2 Auswertepunkt	84
Anlage 5.3 Korrektur Lasertracking	85
Anlage 5.4 Diagramm Auswertung GPS	86
Anlage 6.1 Relevanzrichtungen	89
Anlage 6.2 Mockup Emergency Vehicle Warning	90
Anlage 6.3 Ampelphasenanpassung	91

Anlage 3.1 Geschichte der Satellitenortung

Der Grundstein für die heutige Satellitenortung wurde während des Kalten Krieges gelegt. Die Sowjetunion schaffte es am 4. Oktober 1957 als erste Nation den Kommunikationssatelliten Sputnik in eine erdnahe Umlaufbahn, zu befördern. Um die geheimen Bahndaten des Satelliten herauszufinden, nutzten Mitarbeiter und Studenten der „John Hopkins University“ in Baltimore in den USA das Wissen der Funkortung. Mithilfe drei verschiedener Bodenstationen mit bekannten Positionen konnten sie die Bahnparameter von Sputnik berechnen. Im Umkehrschluss wurde den Forschern klar, dass man mit Satelliten, deren Bahn bekannt ist, die Position eines Objektes am Boden ermitteln kann. Das Prinzip der Ortung wird in Kapitel 3.3.1 näher beschrieben. [12 Kap. 1.2]

Bereits im darauffolgenden Jahr nahmen die USA das erste Navigationssatellitensystem in Betrieb. Dieses wurde *Navy Navigation Satellite System* (NNSS), oft kurz „Transit“ genannt. Es ist der Vorläufer des heute bekannten *NAVSTAR Global Positioning System* (GPS). Das *NAVSTAR* GPS-Programm wurde im Jahr 1973 von der US Air Force ins Leben gerufen. Am Anfang wurde GPS, wie auch das „Transit“ für rein militärische Zwecke entwickelt und genutzt [13 Kap. 2]. Das System nutzte dabei eine Verschlüsselung, um unautorisierte Nutzer, wie beispielsweise ausländisches Militär, von der Mitnutzung abzuhalten. Durch die Verschlüsselung wurde das Signal für diese Nutzer verfälscht. Für zivile Zwecke sinnvoll nutzbar wurde das GPS-System erst im Jahr 2000. Am 2. Mai wurde die sogenannte *Selective Availability* (SA) abgeschaltet. Die Genauigkeit verbesserte sich schlagartig von teilweise über 100 m auf unter 10 m (siehe Fehler: Referenz nicht gefunden). [30]

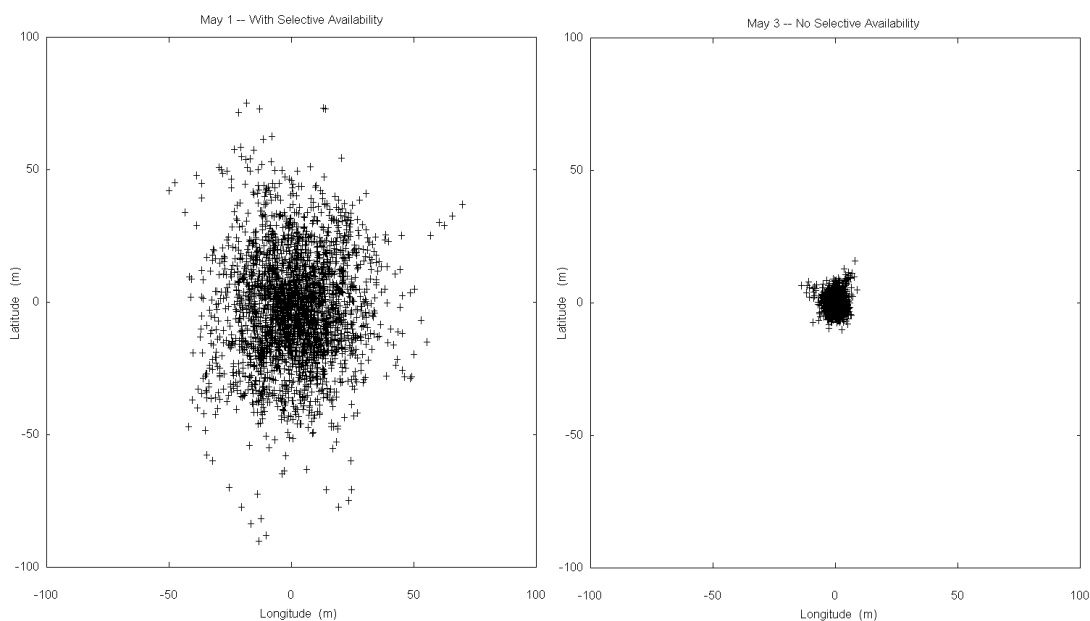


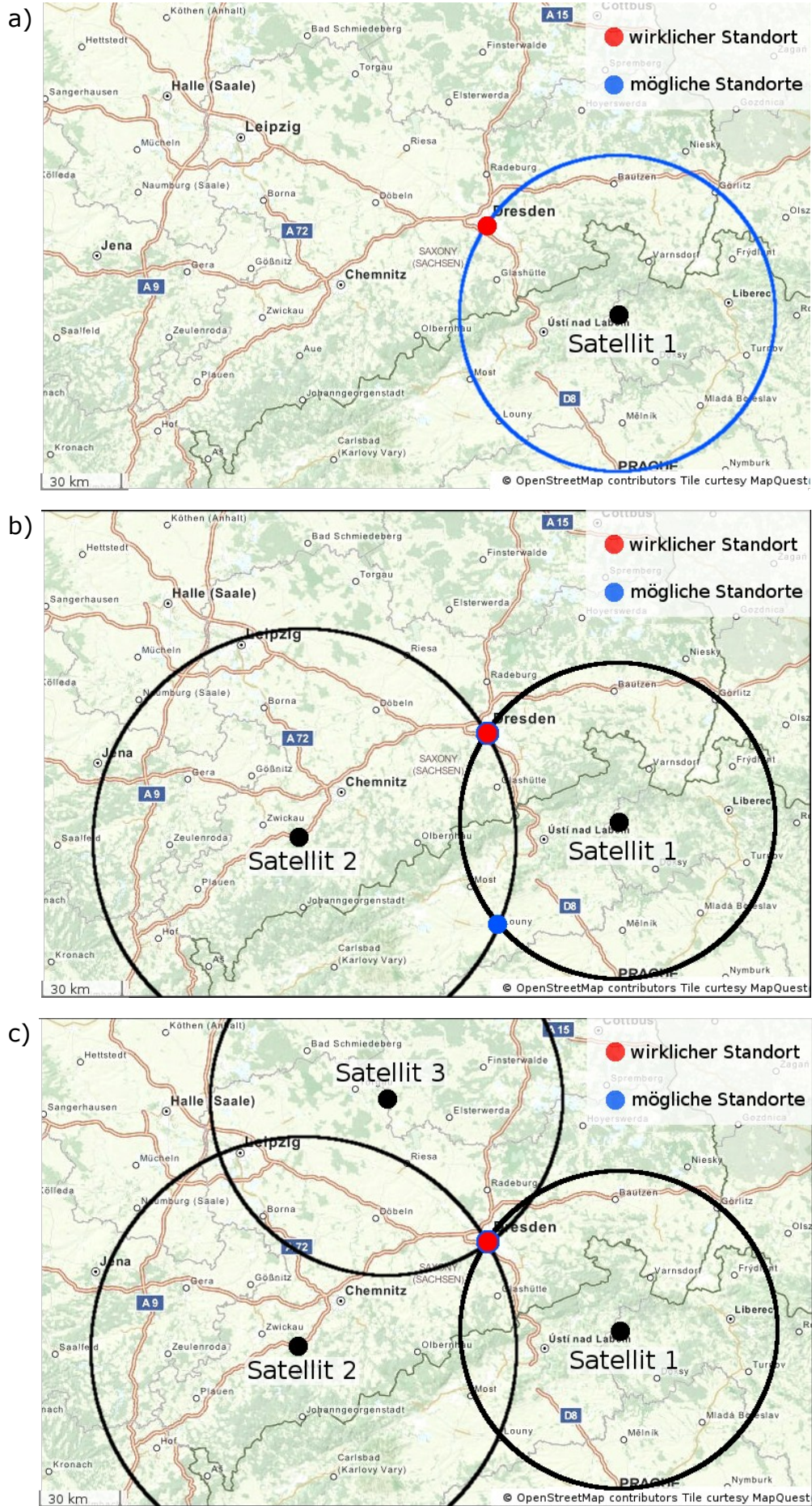
Abbildung 1: GPS-Positionsgenauigkeit vor (links) und nach (rechts) der Aufhebung der

Daraufhin entwickelten sich in kürzester Zeit erste zivile Anwendungen. Diese Abschaltung läutete den Siegeszug der Navigationssysteme ein, egal ob im Handy oder im Fahrzeug. Neben der Navigation wird jedoch auch das hochpräzise Zeitsignal in vielen Anwendungen genutzt.

In den letzten Jahren wurden einige weitere GNSS-Programme initialisiert. Aktuell bereits zivil nutzbar ist das russische *GLONASS*-System (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema). Auch die Volksrepublik China und Indien besitzen beide ein eigenes Satellitenortungsprogramm. Sowohl das chinesische *BeiDou/Compass* sowie das indische *IRNSS* (Indian Regional Navigation Satellite System) bilden kein globales Netz aus Satelliten, sondern ermöglichen zur Zeit nur die Ortung in einem begrenzten Gebiet. China plant die Anzahl seiner Satelliten von heute 15 auf 35 Stück bis 2020 zu erhöhen und damit ebenfalls eine globale Abdeckung zu erreichen [31].

Um unabhängiger vom amerikanischen GPS zu werden, begründete die EU 1994 die Absicht ein eigenes GNSS mit dem Namen *Galileo* aufzubauen. Am *Galileo*-Programm selbst sind neben den EU-Staaten jedoch noch zahlreiche weitere Länder beteiligt. Nach zwei Testsatelliten wurden im Jahr 2011 die ersten „echten“ Navigationssatelliten für *Galileo* in ihre Umlaufbahn gebracht. Mit den im September 2015 gestarteten zwei Satelliten befinden sich derzeit zehn Stück im Orbit [32]. Ab einer Anzahl von 18 Satelliten soll das System offiziell in Betrieb gehen. Diese Zahl wird voraussichtlich im Jahr 2017 erreicht. Bis zum Jahr 2020 soll der Vollausbau mit insgesamt 30 Satelliten abgeschlossen sein [33]. [12Kap. 10; 13Kap. 5]

Anlage 3.2 Prinzip GNSS-Ortung



Anlage 5.1 Übersicht Messergebnisse

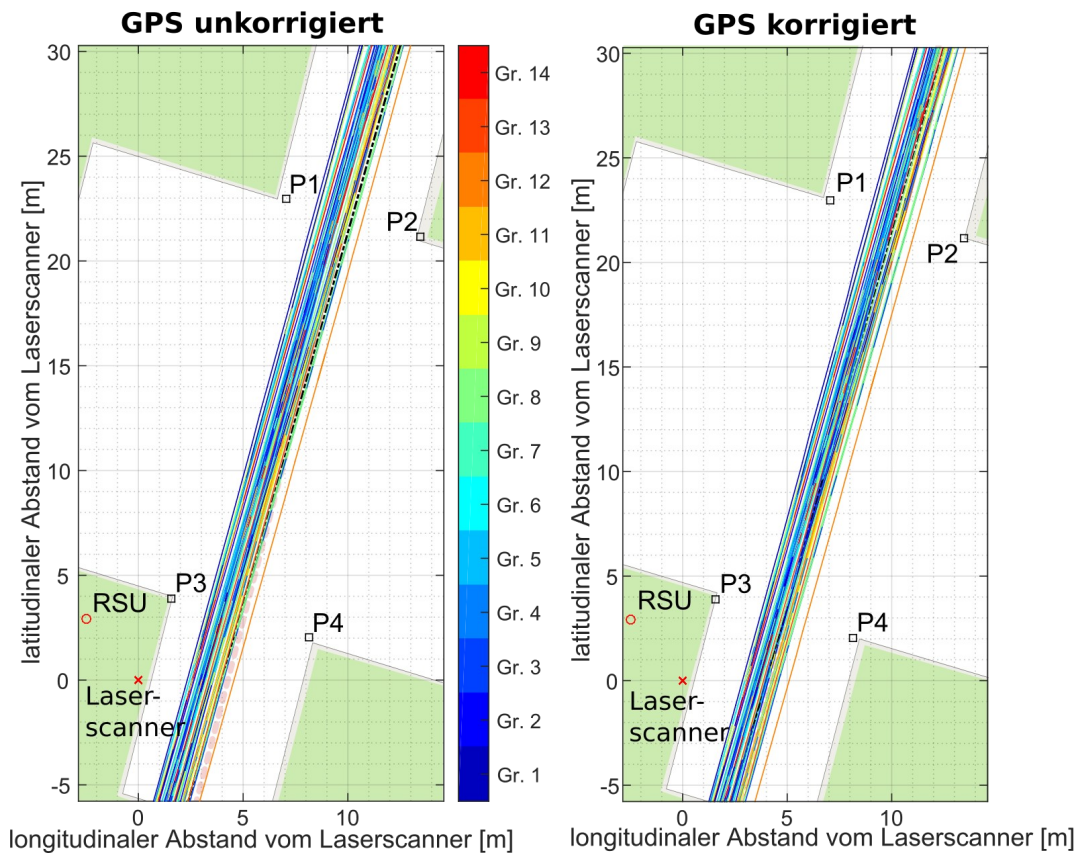
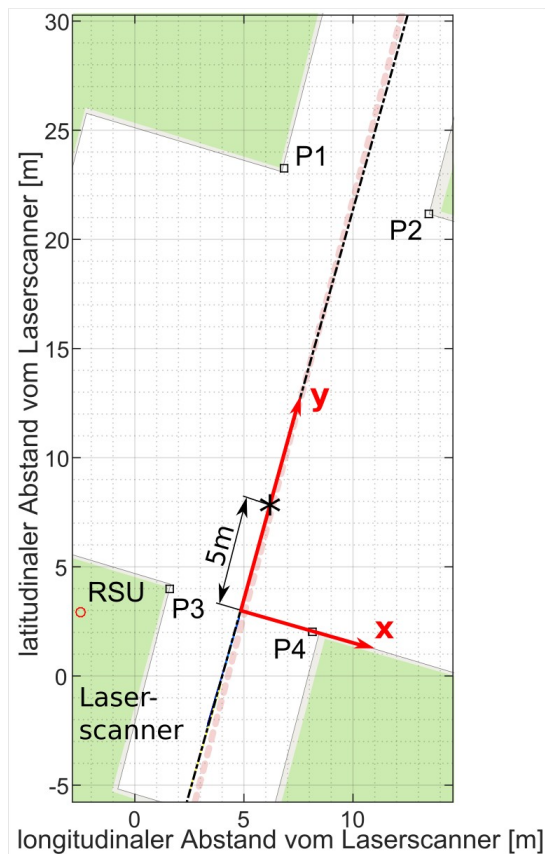


Abbildung 2: Übersicht der Messergebnisse und Messaufbau

Anlage 5.2 Auswertepunkt



Anlage 5.3 Korrektur Lasertracking

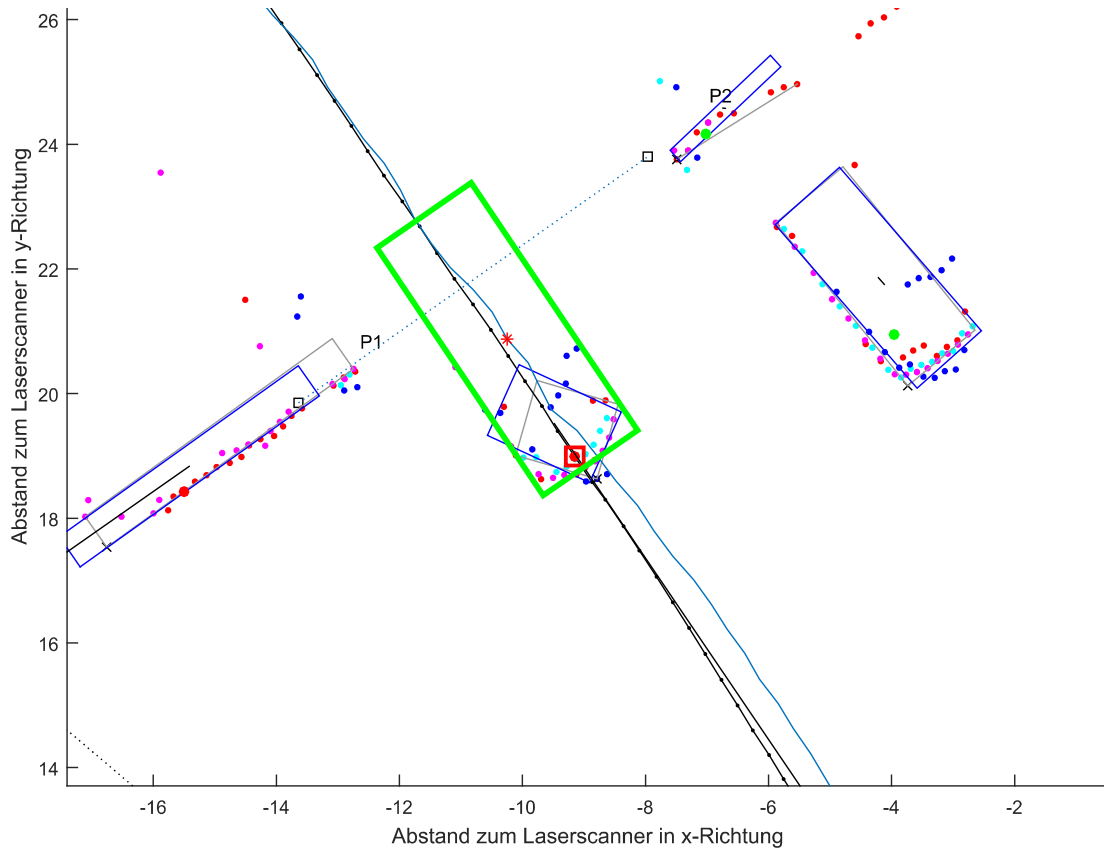


Abbildung 3: Korrektur im Fernbereich

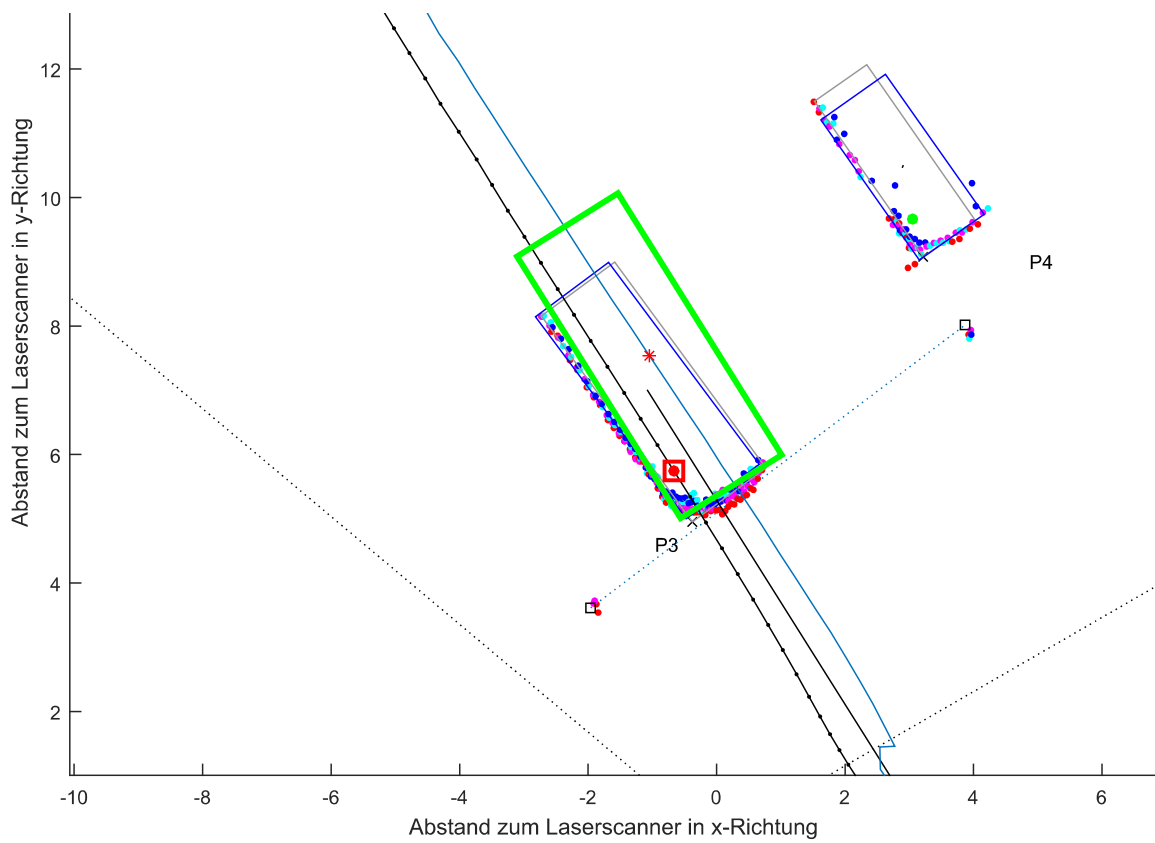


Abbildung 4: Korrektur im Nahbereich

Anlage 5.4 Diagramm Auswertung GPS

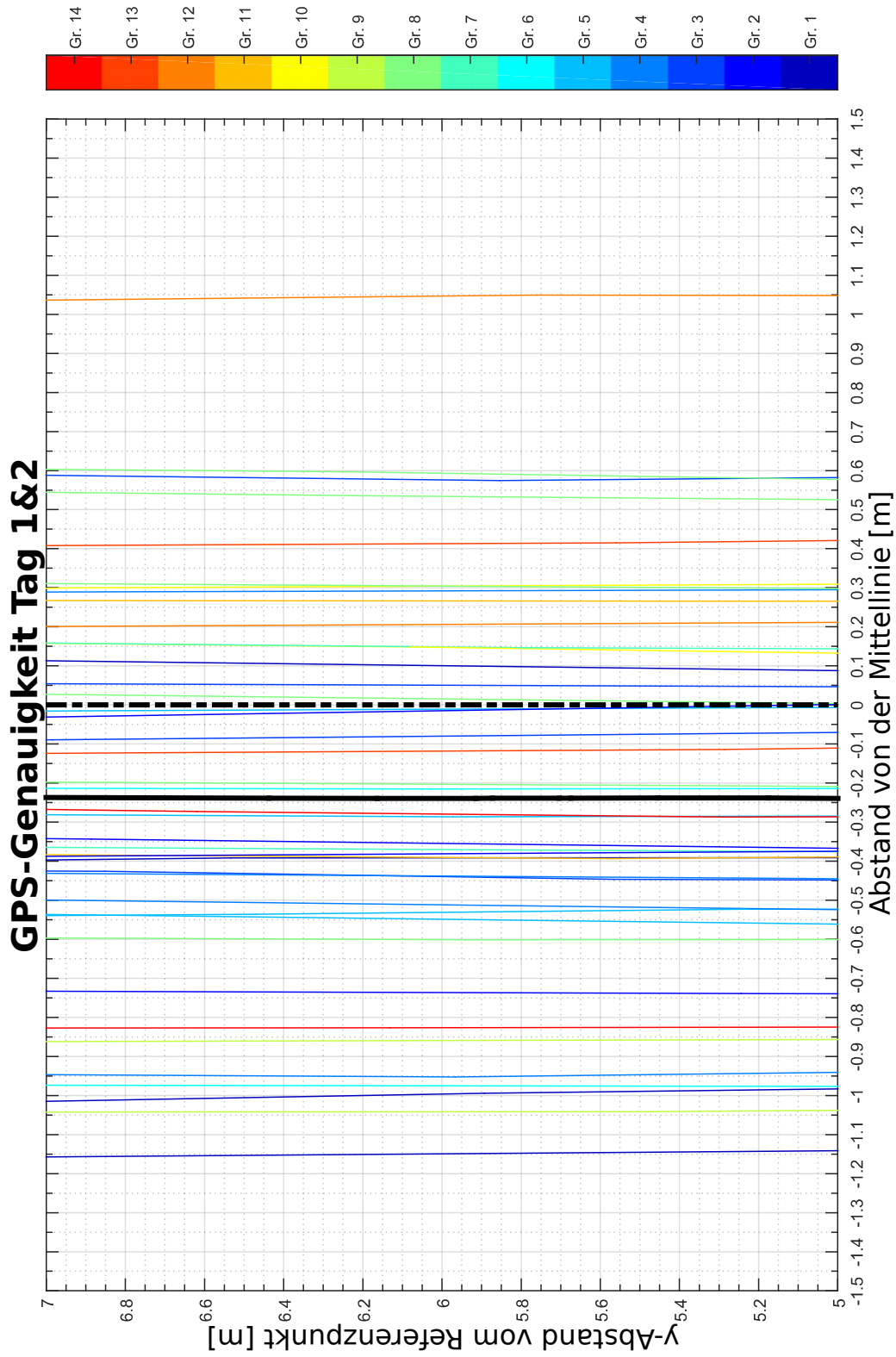


Abbildung 5: GPS-Spuren aller Messungen des 1. Tages

GPS-Genauigkeit Tag 1

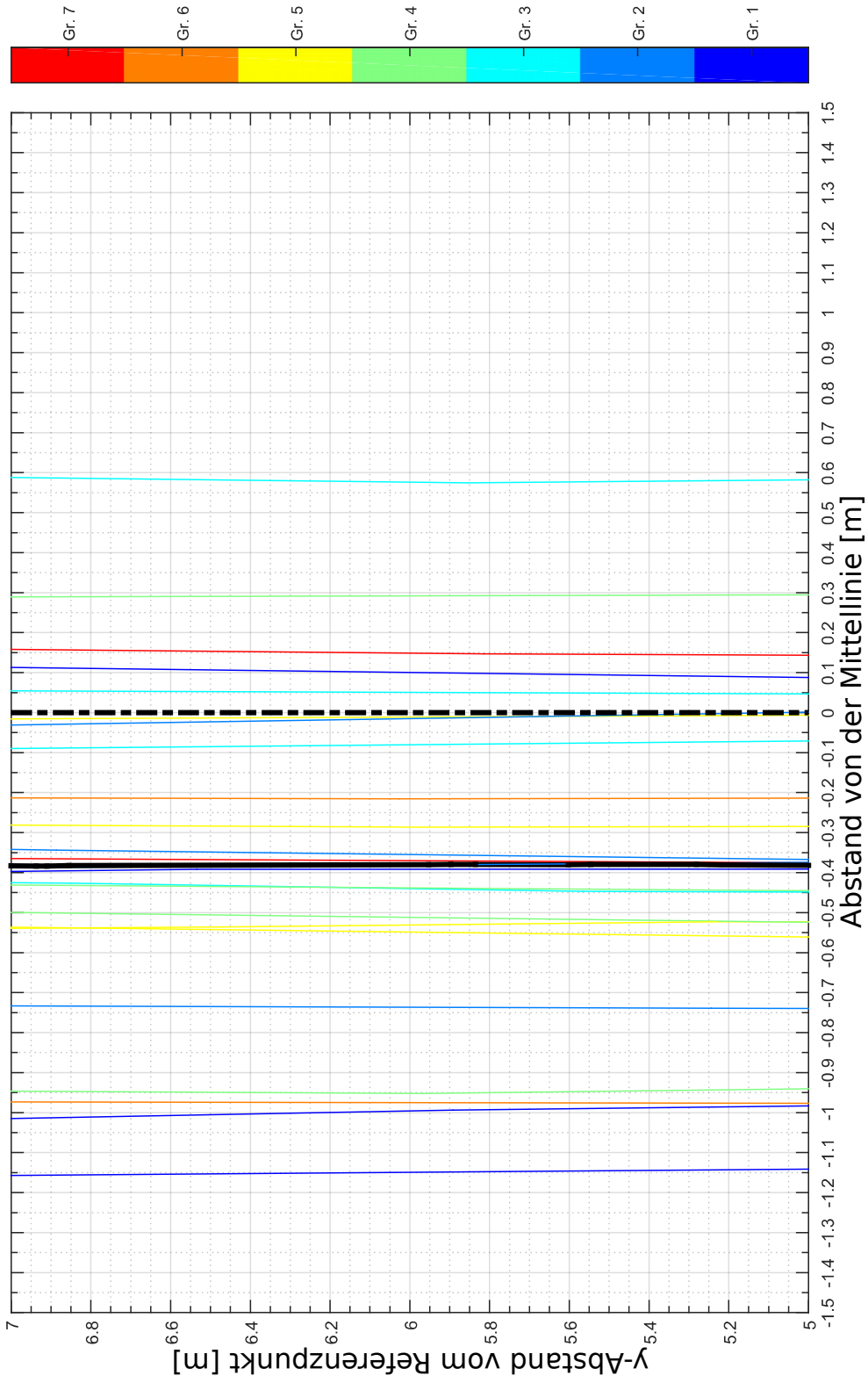


Abbildung 6: GPS-Spuren aller Messungen des 1. Tages

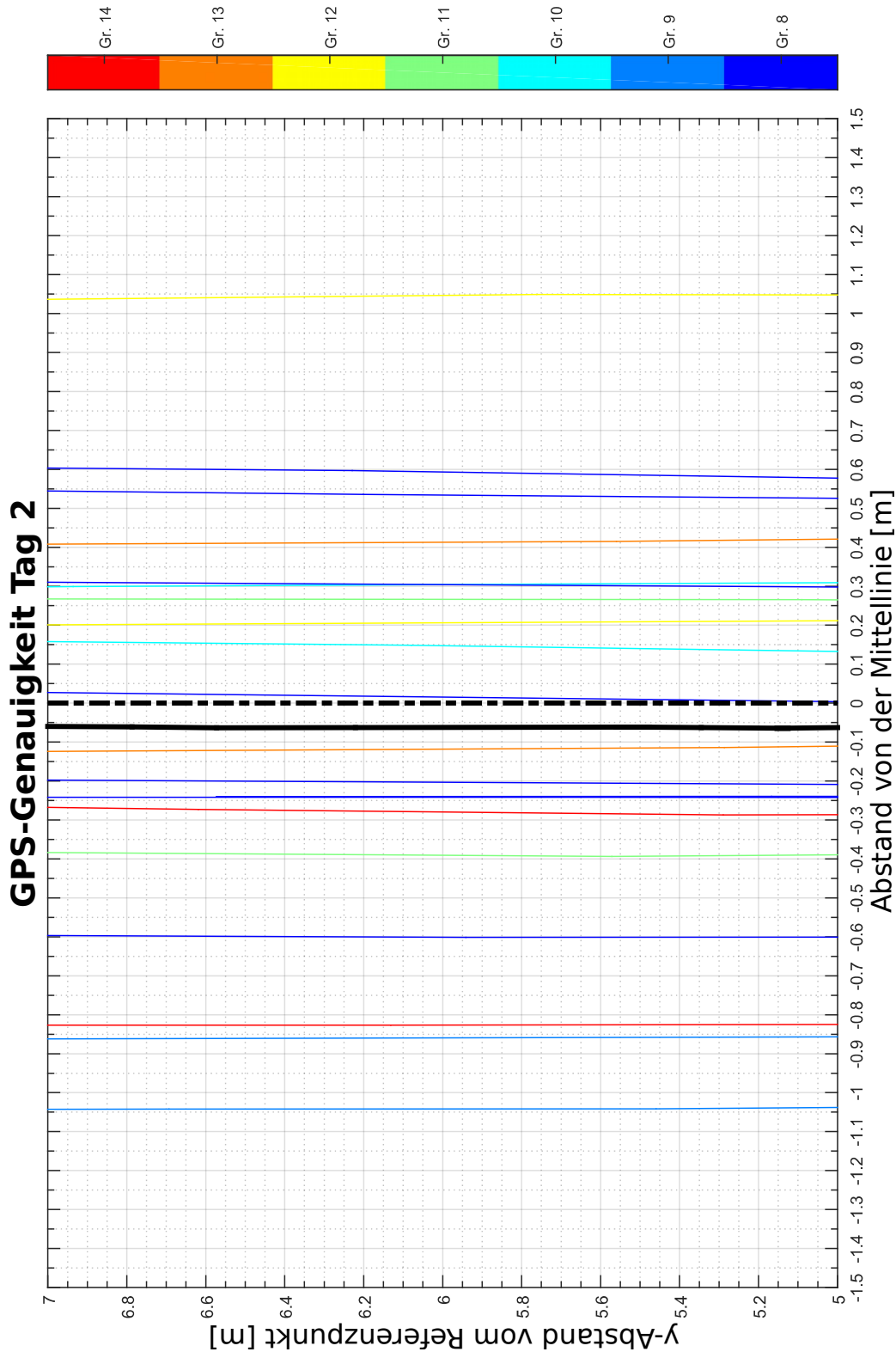
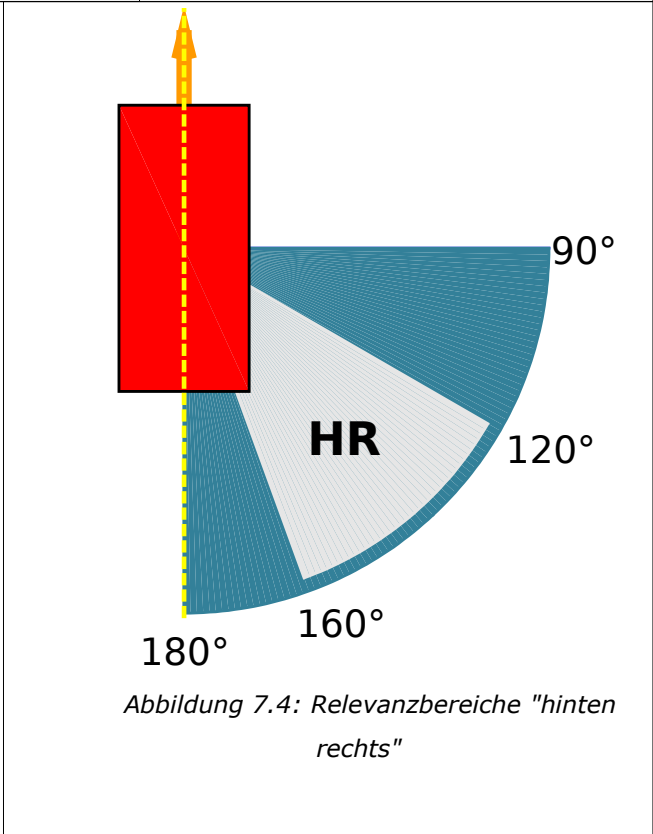
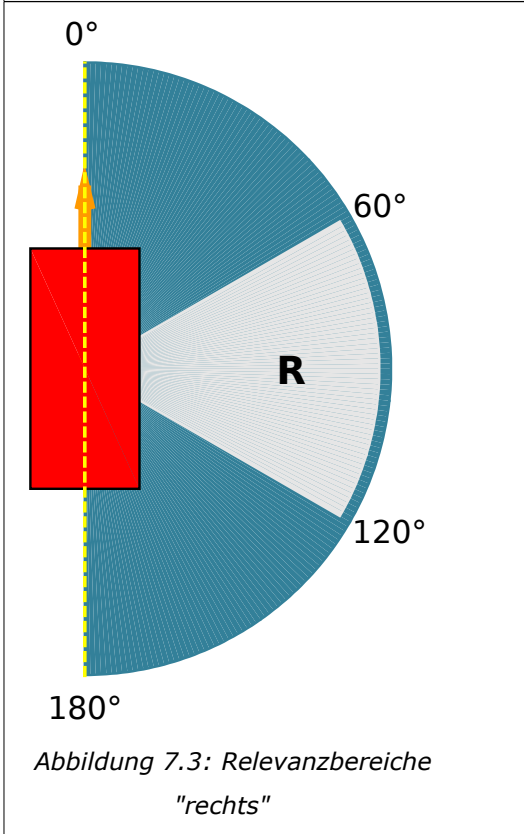
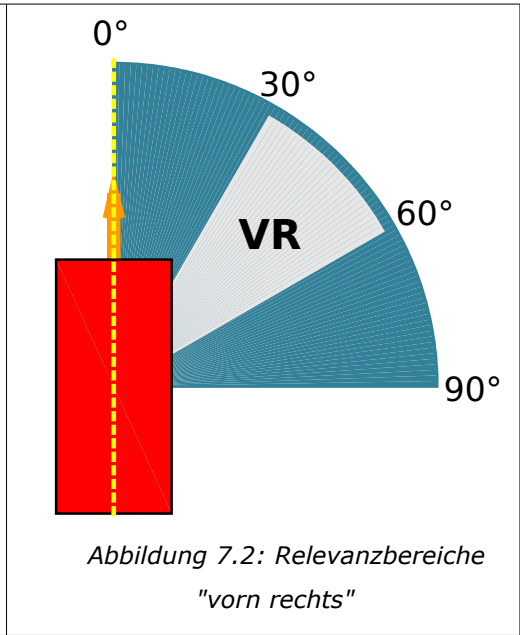
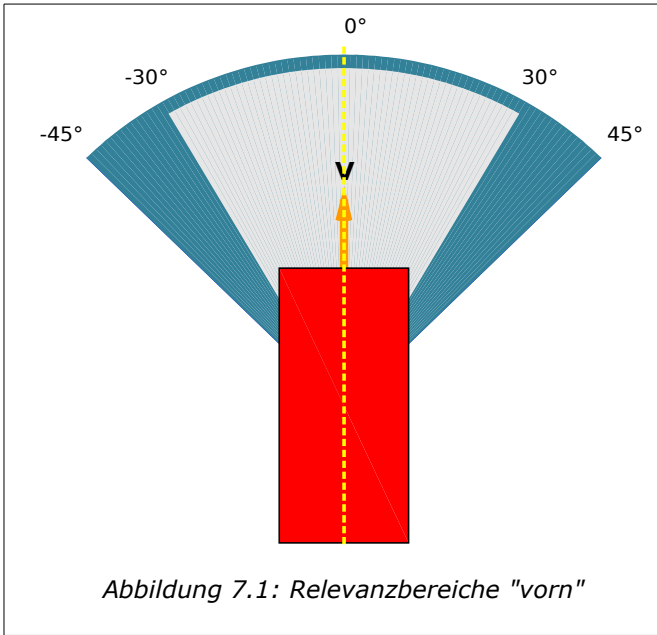


Abbildung 7: GPS-Spuren aller Messungen des 2. Tages

Anlage 6.1 Relevanzrichtungen



Anlage 6.2 Mockup Emergency Vehicle Warning



Abbildung 8: Mockup EVW-Warnung Fahrzeugsymbol



Abbildung 9: Mockup EVW-Warnung Blaulicht

Anlage 6.3 Ampelphasenanpassung

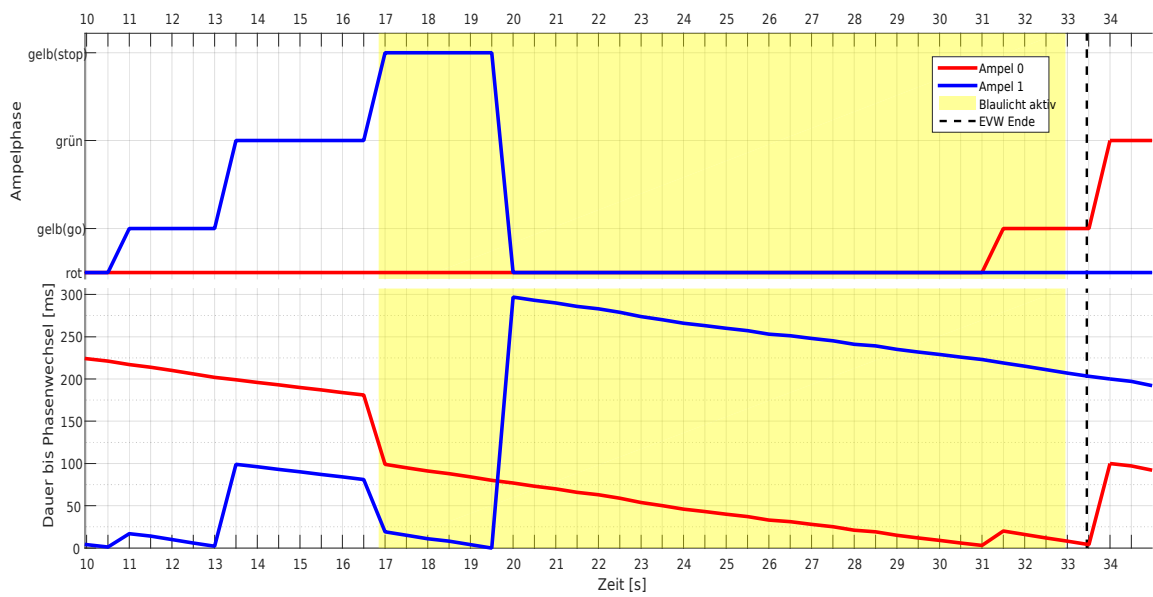


Abbildung 10: EVW während Grün-Phase der Gegenrichtung

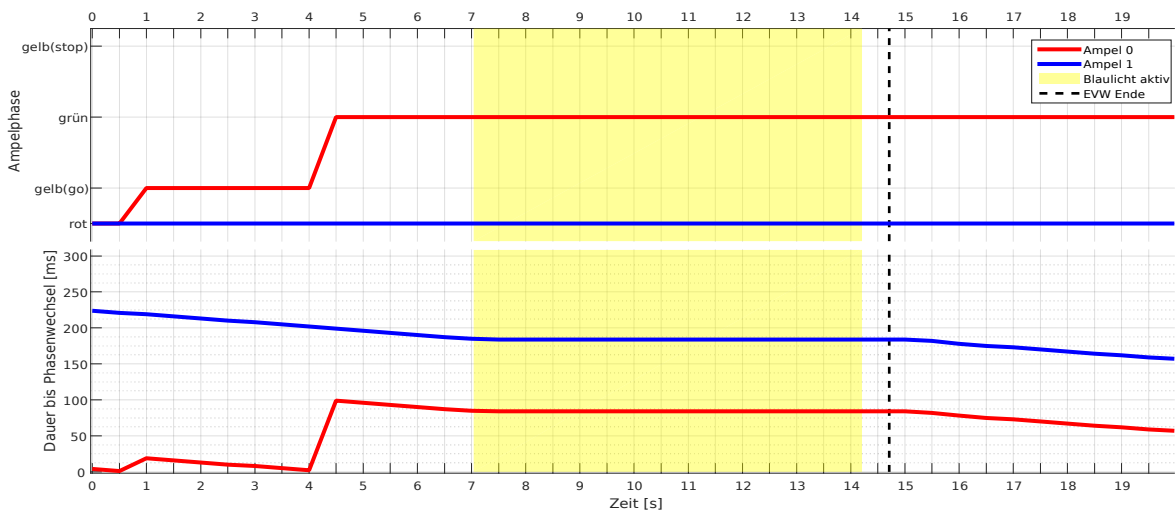


Abbildung 11: EVW während Grünphase in Fahrtrichtung

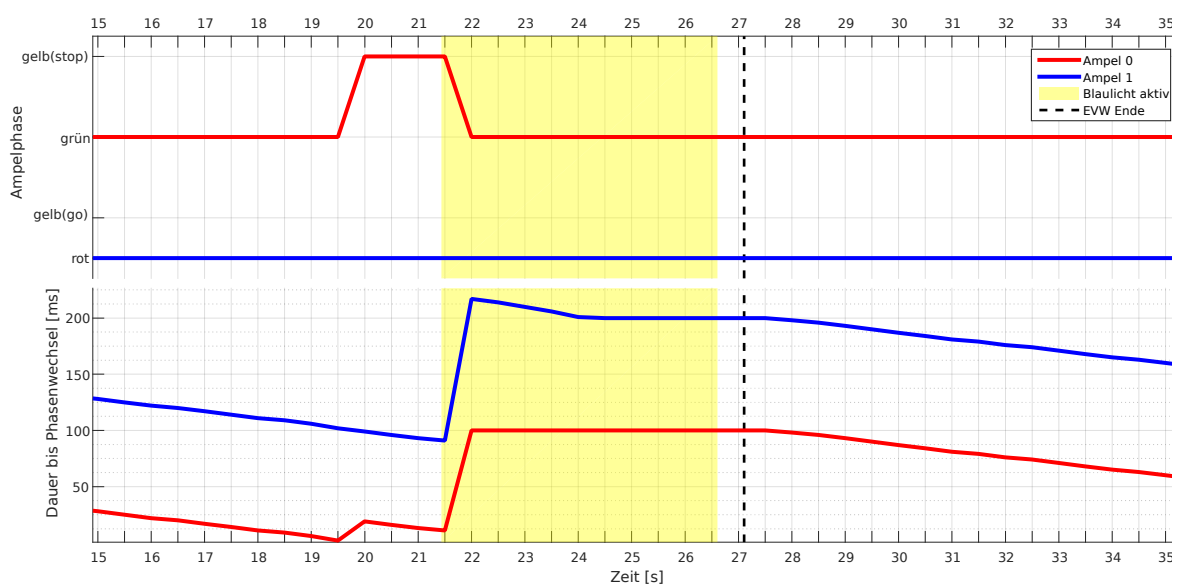


Abbildung 12: EVW beim Umschalten zu Rot

