

Masterarbeit

Oliver Splieth

Entwicklung und Bewertung einer Methode zur
infrastrukturunterstützten Positionsbestimmung
für ein autonomes und vernetztes Lastenfahrrad

Oliver Splieth

Entwicklung und Bewertung einer Methode zur
infrastrukturunterstützten Positionsbestimmung für
ein autonomes und vernetztes Lastenfahrrad

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im gemeinsamen Masterstudiengang Mikroelektronische Systeme
am Fachbereich Technik
der Fachhochschule Westküste
und
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. rer. nat. Rasmus Rettig
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Berger

Abgegeben am 30. März 2021

Oliver Splieth

Thema der Masterarbeit

Entwicklung und Bewertung einer Methode zur infrastrukturunterstützten Positionsbestimmung für ein autonomes und vernetztes Lastenfahrrad

Stichworte

V2X, GNSS, Ultrabreitband, UWB, Positionsbestimmung, vernetztes Fahren, autonomes Fahren, inertielle Messeinheit, Sensorfusion, Triangulation

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Konzept für eine präzise Positionsbestimmung im Straßenverkehr für ein vernetztes, elektrisches Lastenfahrrad vorgestellt. Mit Ultrabreitband und inertialer Sensorik wird ein Triangulationsverfahren angewandt, um indirekt den Ankunfswinkel am UWB-Empfänger zu bestimmen und so eine Position ermitteln zu können. Mit der Methode soll eine autonome Steuerung des Lastenfahrrades in einer Testumgebung erprobt werden.

Oliver Splieth

Title of the paper

Development and evaluation of a method for infrastructure-supported position determination for an autonomous and connected cargo bicycle

Keywords

V2X, GNSS, Ultra wideband, UWB, Position determination, connected driving, autonomous driving, inertial measurement unit, sensor fusion, triangulation

Abstract

In this paper, a concept for a precise position determination in road traffic for a connected electric cargo bike is presented. Using ultra-wideband and inertial sensing, a triangulation method is applied to indirectly determine the angle of arrival at the UWB receiver to be able to determine a position. The method will be used to test an autonomous control of the cargo bike in a test environment.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Menschen in meinem Umfeld für ihre Unterstützung während meines Studiums und im Speziellen bei der Erstellung dieser Masterarbeit danken.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern Leo Mustafa und Eckhard Walters (beide NXP Semiconductors) für ihre sehr kompetente Betreuung und stetige Unterstützung. Bedanken möchte ich mich auch bei den Kollegen von NXP, die mir die notwendige Hardware im Rahmen dieser Masterarbeit zur Verfügung gestellt haben. Die Hilfe und Unterstützung im ISI Team bei NXP unter den studentischen und nichtstudentischen Kollegen weiß ich sehr zu schätzen.

Auch möchte ich mich bei meinem Prüfer Herrn Prof. Rasmus Rettig (HAW Hamburg) für die guten Ideen und Anregungen bedanken. Für die Übernahme der Zweitbetreuung möchte ich mich bei Herrn Prof. Berger (FH Westküste Heide) bedanken.

Ein besonderer Dank geht auch an meine Freundin und Familie, die mich im Studium begleitet und unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	9
Glossar	11
1. Einleitung	13
1.1. Einführung und Motivation	13
1.1.1. Zielsetzung dieser Arbeit	14
2. Theoretische Grundlagen	15
2.1. Positionsbestimmung allgemein	15
2.1.1. Koordinatensysteme	15
2.1.2. Verfahren zur Positionsbestimmung	16
2.2. Technologien zur Positionsbestimmung	22
2.2.1. GNSS	22
2.2.2. Ultra Wideband	26
2.3. V2X Kommunikation	30
2.3.1. IEEE 802.11p	30
2.3.2. Intelligentes Verkehrssystem	31
2.4. MQTT - Kommunikation	32
2.5. Inertiale Messeinheit	34
2.6. Sensorfusion	36
2.6.1. Komplementärfilter	36
2.6.2. Kalman-Filter	36
2.6.3. Lineares Kalman-Filter	37
2.6.4. Extended Kalman-Filter	39
2.7. Messfehler- und Ausgleichsrechnung	40
2.7.1. Fehlerarten	40
2.7.2. Ausgleichsrechnung	40
3. Rahmenbedingungen	42
3.1. Gesamtsystem	42

3.2. Pedelec - das elektrische Lastenfahrrad	43
3.2.1. Allgemeine Bestandteile des Fahrrades	44
3.2.2. Erweiterungen	44
3.2.3. MK5 V2X On-Board-Unit	48
3.2.4. Hardwareerweiterungen am Pedelec im Rahmen der Masterarbeit	48
3.3. Lichtsignalanlage	52
3.4. Demo-Kreuzung	52
4. Analyse	53
4.1. Szenario: Positionsbestimmung im abgedeckten urbanen Raum	53
4.2. Anforderungen und Randbedingungen	55
4.2.1. Analyse der Anforderungen	56
4.2.2. Genauigkeit der UWB-Messungen	60
4.3. Existierende Lösungsansätze	62
4.4. Schlussfolgerungen	63
5. Konzeption	64
5.1. Systemarchitektur	64
5.2. Positionsbestimmungsmethode	65
5.2.1. Lagebestimmung	66
5.2.2. Richtungsbestimmung	66
5.2.3. Bestimmung des AoA	67
5.2.4. Positionsberechnung	69
5.2.5. Positionsbestimmungsalgorithmus	71
5.2.6. Sensorfusion	73
5.2.7. Navigationsalgorithmus	75
5.3. Vorverarbeitung der Daten	76
5.4. Aufbau der Demo-Kreuzung	77
6. Entwicklung	81
6.1. Hardwareaufbau	81
6.1.1. Pedelec Hardwareaufbau	81
6.1.2. LSA Hardwareaufbau	82
6.2. Softwareaufbau	83
6.2.1. Übersicht	83
6.2.2. Sensormodule	85
6.2.3. RTMS-Modul	86
6.2.4. Evaluation-Modul	87
6.2.5. Navigation-Modul	87
6.2.6. ETSI-Applikation	88
6.2.7. Messablauf	88

6.3. Integrationstest	89
6.4. Ergebnisse	90
6.4.1. Vergleich zwischen GPS und UWB-Positionsbestimmung	90
6.4.2. Messergebnisse mit NLOS-Bedingungen	91
6.4.3. Messergebnisse mit LOS-Bedingungen	94
6.4.4. Simulation einer Navigation	95
7. Bewertung und Ausblick	98
7.1. Zusammenfassung	98
7.2. Bewertung	99
7.3. Ausblick	100
Literaturverzeichnis	101
A. Anhang	105
A.1. Quellcode	105
A.2. Auswertungsskript und Testdaten	105
A.2.1. Jupyter-Python Auswertungsskript	105
A.2.2. Testdaten	106

Tabellenverzeichnis

3.1. Auflistung Bestandteile Pedelec	45
3.2. LED-Streifen Modi	46
3.3. IMU Spezifikationen - fxos8700	50
3.4. IMU Spezifikationen - fxa21002	50
3.5. UWB-Ranging Konfiguration	51
5.1. Winkelbestimmung des Positionsbestimmungsalgorithmus'	71
5.2. Variablenbeschreibungen Positionsalgorithmus	72
6.1. Positionsabweichungen eines Testdurchlaufs 1	93
6.2. Positionsabweichungen eines Testdurchlaufs 2	95

Abbildungsverzeichnis

2.1. Triangulation mit Dreieckswinkeln und -seiten nach dem Prinzip [18], [46]	17
2.2. Multilateration	19
2.3. TOF Prinzip	20
2.4. AoA	21
2.5. AoA durch Phasendifferenzermittlung	21
2.6. GNSS Prinzip	23
2.7. GNSS Abdeckung	25
2.8. Vergleich von schmalbandiger Frequenzbänder mit dem von Ultrabreitband [23]	26
2.9. UWB Frequenzspektrum	27
2.10. Struktur UWB Frame	28
2.11. pcap Datei der MAPEM	32
2.12. MQTT Kommunikation	33
2.13. MEMS-Beschleunigungssensor	35
2.14. Orientierung mit einer IMU	36
2.15. Kalman-Filter Zustandsdarstellung	37
2.16. Varianz und Position	38
2.17. Kalman Algorithmus	39
2.18. Ausgleichsgerade	41
3.1. Gesamtsystem	42
3.2. Foto vom Pedelec	44
3.3. Hardwarebestandteile am Pedelec	45
3.4. Pedelec HMI	47
3.5. Mk5 Cohda Wireless Box	49
3.6. Mk5 Cohda Wireless Box als RSU	49
3.7. IMU	49
3.8. UWB Board	51
3.9. Demokreuzung, eigene Darstellung	52
4.1. GNSS Messfahrt	54
4.2. Prinzip der AoA-Lokalisierung	58
4.3. Tabelle Positionsabweichung	59
4.4. Tabelle Positionsabweichung 2	59

4.5. Vorab Distanzmessungen	60
4.6. Distanzmessungen mit NLOS	61
5.1. Konzept Architektur	65
5.2. Magnetometer-Messung	67
5.3. Prinzip der Positionsbestimmung	68
5.4. Quadranten-Übersicht	70
5.5. Blockübersicht Positionsbestimmungsmethode	72
5.6. Konzept der Navigation	75
5.7. Distanzwerte - Gleitender Mittelwert und Tiefpassfilter	77
5.8. Demokreuzung - Übersicht	78
5.9. pcap-Dateiinhalte von MAPEM-Nachricht der Demokreuzung	79
5.10. Bewegungen- und Fahrbahnübersicht	80
6.1. Hardwareaufbau Pedelec	82
6.2. Hardwareaufbau LSA	83
6.3. Softwareübersicht	84
6.4. Blockschaubild UWB-Modul	85
6.5. Blockschaubild IMU-Modul	86
6.6. Blockschaubild Odometer-Modul	86
6.7. Blockschaubild RTMS-Modul	87
6.8. Blockschaubild Evaluation-Modul	87
6.9. Blockschaubild Navigation-Modul	88
6.10. Messablauf	89
6.11. Integrationsteststrecke	90
6.12. Messergebnisse - Vergleich zwischen GPS- und UWB-Lokalisierung	91
6.13. Messergebnisse nlos	92
6.14. Messergebnisse nlos - Histogramm	93
6.15. Messergebnisse los	94
6.16. Messergebnisse los - Histogramm	95
6.17. Messergebnisse Navigation 1	96
6.18. Messergebnisse Navigation 2	97

Glossar

Abb. Abbildung

AoA Angle of Arrival

ASN Abstract Syntax Notation

BLE Bluetooth Low Energy

C-ITS Cooperative Intelligent Transport System

C-V2X Cellular Vehicle to Anything

dBm Dezibelmilliwatt

DS-TWR Double Sided Two Way Ranging

ETSI Europäisches Institut für Telekommunikation

GHz Gigahertz

GNSS Global Navigationssatellitensystem

GPS Global Positioning System

HMI Human Mashine Interface

IC Integrated Circuit

IMU Inertial Measurement Unit

ITS Intelligent Transport System

LOS Line of Sight

LSA Lichtsignalanlage

MEMS Mikroelektromechanisches System

MHz Megahertz

NLOS Non Line of Sight

OBU On-Board-Unit

PKE Passive Keyless Entry

PKI Public Key Infrastructure

RSU Roadside Unit

SS-TWR Single Sided Two Way Ranging

TDoA Time Difference of Arrival

ToA Time of Arrival

ToF Time of Flight

URE User Range Error

UWB Ultra Wide Band

V2X Vehicle to Anything

VRU Vulnerable Road User

WLAN Wireless Local Area Network

z.B. zum Beispiel

1. Einleitung

Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Menschen. Dieses Bedürfnis ist wichtig für den Wohlstand und Fortschritt der Gesellschaft. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Teilaspekt der Verkehrsmobilität behandelt, welcher durch technologischen Fortschritt einer starken Veränderung ausgesetzt ist. Zu diesen Veränderungen gehören unter anderem eine vernetzte Infrastruktur und autonom fahrende Personen- und Transportfahrzeuge. Mit der steigenden Anzahl autonomer Verkehrsteilnehmer bekommt ein Thema besondere Wichtigkeit - eine präzise Positionsbestimmung. Insbesondere die Genauigkeit einer Positionsbestimmung auf Fahrspurebene ist ein Gebiet, welches einer Weiterentwicklung bestehender und Erforschung neuer Technologien bedarf. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Verbesserung der Genauigkeit einer Lokalisierung auf Fahrspurebene. Diese Verbesserung soll mit der Entwicklung und Bewertung einer Methode im Bereich des Straßenverkehrs erreicht werden.

1.1. Einführung und Motivation

Das Ziel einer vernetzten Infrastruktur ist die Erhöhung der Sicherheit, Effizienz und Umweltfreundlichkeit der Mobilität im Straßenverkehr. Zugleich trägt diese zur Verbesserung der autonomen Fortbewegung vernetzter Fahrzeuge bei. Diese bekommen aktuelle Verkehrsnachrichten nicht über dritte Instanzen wie Basisstationen, sondern direkt von dem Fahrzeug, welches ein Ereignis verursacht hat oder beteiligt gewesen ist. Möglich gemacht wird dies vor allem durch die V2X Kommunikation. Hier entsteht aufgrund der sehr geringen Verzögerung beim Informationsaustausch ein großer Vorteil. Auch Fahrradfahrer oder Fußgänger können entweder an der Kommunikation beteiligt sein oder von der Fahrzeugsensorik erkannt werden.

Unfälle und Staus können im Vorweg vermieden werden. Mit einer maximalen Latenzzeit gemäß des ITS Standards von weniger als 100 ms für sicherheitskritische Anwendungen sollen die vernetzten Objekte bei potentiellen Gefahren schneller reagieren können, als es dem Menschen möglich wäre [24]. Eine wichtige Grundvoraussetzung ist jedoch die genaue Bestimmung des momentanen Ortes eines Verkehrsteilnehmers. Mit Hilfe der globalen Ortungsmethode *GPS* lassen sich Positionen mit einer Abweichung von weniger als 7 Metern in 95 % der Zeit nicht genau genug bestimmen [37]. Im urbanen Umfeld kann eine

Verschlechterung der Genauigkeit durch eine Sichtabdeckung der Satellitensignale hervorgerufen werden [19]. Die Auslöser hierfür sind oftmals hohe und dicht platzierte Gebäude. Dieser Umstand führt dazu, dass weitere Möglichkeiten für eine genauere Lokalisierung bereits heutzutage Gegenstand der Forschung und Entwicklung sind.

Die Anforderungen an Lokalisierungsmethoden steigen mit dem Navigieren auf Fahrspurebene. Dabei haben Kraftfahrzeuge und Fahrräder ihre eigenen Genauigkeitsanforderungen. Mit den schmaleren Fahrradwegen sinkt auch die Toleranz für eine Positionsabweichung. Neben einer auf Satellitenortung basierenden Methode, können lokale Referenzsysteme und körperbezogene Bewegungsbeobachtungen in die Untersuchung miteinbezogen werden. Für ein solches lokales Referenzsystem kann Ultra Wideband möglicherweise als Technologie eine zufriedenstellende Lösung für das Problem sein.

1.1.1. Zielsetzung dieser Arbeit

Neben dem Hauptziel der Arbeit, eine genauere Positionsbestimmungsmethode im Straßenverkehr zu erarbeiten und zu untersuchen, ist die Konzeption, Implementation und Evaluierung der Methode anhand eines prototypischen Aufbaus umzusetzen. Im Zentrum steht das autonome und vernetzte Lastenfahrrad (Pedelec), das sich mit einer Lichtsignalanlage auf einer Demo-Kreuzung zu einem Gesamtsystem zusammenfügen lässt. Als weiteres Ziel ist eine autonome Steuerung des Lastenfahrrades mit Hilfe der entwickelten Positionsbestimmungsmethode zu erproben.

Um den Leser zum Verständnis der Hintergründe mit dem notwendigen Wissen auszustatten, sind theoretische Grundlagen zu erarbeiten. In diesem Kapitel sollen neben grundsätzlichen mathematischen Methoden zur Positionsbestimmung auch Technologien beschrieben werden, bei denen diese zum Einsatz kommen.

Gegenstand der Arbeit soll auch eine Beschreibung der Rahmenbedingungen sein, um zu erläutern, welcher Aufbau vor dieser Arbeit Bestand hatte und welche Erweiterungen zur Erfüllung des Ziels notwendig sind.

Die Analyse der Rahmenbedingungen und die zur Verfügung stehenden Technologien führen zu Randbedingungen und Anforderungen für ein mögliches Konzept. Dieses ist in einem separaten Kapitel zu erläutern. Die zu entwickelnde Positionsbestimmungsmethode ist ein wesentlicher Teil der Arbeit und soll ausführlich beschrieben werden. Pedelec und Lichtsignalanlage bilden jeweils Subsysteme, die miteinander vernetzt sind und Informationen austauschen. Diese Subsysteme sind mit Hardware und Software so auszustatten, dass die erforderlichen Funktionen erfüllt werden können. Die Implementierung der Hard- und Software ist mit einem Integrationstest am Ende der Realisierungs- und Entwicklungsphase zu überprüfen. Die Funktionalität des Gesamtsystems wird in den Messergebnissen verdeutlicht. Alle im Rahmen dieser Arbeit erlangten Informationen sind ausführlich und sorgfältig zu dokumentieren.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden zunächst wichtige theoretische Grundlagen erläutert. Da der Hauptfokus dieser Arbeit das Entwickeln und Bewerten einer Positionsbestimmungsmethode im Bereich des Straßenverkehrs im urbanen Umfeld ist, werden verschiedene Teilaspekte vorgestellt. Es wird die Frage geklärt, was Positionsbestimmung im Allgemeinen ist und welche Methoden eingesetzt werden können, um den Standort eines Objektes zu ermitteln. Mit der Fahrzeugkommunikation V2X wird eine Maschinen-zu-Maschinen Kommunikation für den Straßenverkehr thematisiert und die Anwendung in dieser Arbeit erläutert. Es wird zudem die zum Einsatz kommende Sensorik näher beschrieben und eine Möglichkeit behandelt, Sensordaten zu kombinieren.

2.1. Positionsbestimmung allgemein

Positionsbestimmung oder Lokalisierung im Allgemeinen ist die Bestimmung des momentanen Ortes eines beweglichen Objektes. Dies gilt sowohl in der Luft, auf dem Land oder im Wasser. Um einen Standpunkt ermitteln zu können und den Ort eines Objektes zu beschreiben, werden Koordinaten benutzt. Diese beziehen sich auf das jeweilige Koordinatensystem. Diese verschiedenen Koordinatensysteme werden zu Beginn des Kapitels erläutert. Für die Navigation ist die Ortung essentiell. Mit ihrer Hilfe kann ein Kurs gewählt und kontrolliert werden [18]. Im Gegensatz zur Vermessung eines Objektes oder Ortes, ist die Genauigkeit bei der Lokalisierung bisher geringer und weniger entscheidend gewesen. Dies kann sich aber mit dem Fortschritt in der autonomen Fahrzeugindustrie ändern. Für die Positionsbestimmung im Rahmen dieser Arbeit, wird eine zweidimensionale Ebene angenommen, da vorausgesetzt wird, dass sich das elektrische Lastenfahrzeug lediglich in lokalen Referenzsystemen auf der Erdoberfläche fortbewegt. Bei Drohnen würde dieser Fall nicht gelten, da die Lokalisierung hier auch Aussagen über die Höhe ermöglichen muss.

2.1.1. Koordinatensysteme

Eine Ortung kann ohne Bezug nicht stattfinden. Ein Koordinatensystem stellt diesen Bezug her. Es gibt verschiedenen Koordinatensysteme, welche sich in die zwei Hauptarten der

astronomischen und terrestrischen Koordinatensysteme unterteilen lassen. Während erste unter anderem dabei helfen, die Position von Himmelskörpern anzugeben, sind letztere nützlich, für Vermessungs- und Navigationsaufgaben auf der Erdoberfläche. Durch die Erdrotation haben Punkte auf dem Erdkörper keine festen astronomischen Koordinaten. Um Positionen von einem Koordinatensystem ins andere zu überführen, existieren Koordinatentransformationen. Ein Beispiel, bei dem eine solche Transformation angewandt wird, ist die Berechnung von terrestrischen Koordinaten aus Satellitenpositionen. Hierbei werden die terrestrischen Koordinaten der Satelliten benötigt. Im Folgenden werden wesentliche Eigenschaften und Unterschiede bekannter Koordinatensysteme erwähnt ([18], [28]).

- *Astronomisches Koordinatensystem*: Darunter fällt das Inertialsystem mit den folgenden Bedingungen:
 - (1) Der Koordinatenursprung ist in Ruhelage oder führt eine lineare Bewegung aus
 - (2) Die Richtungen der Koordinatenachsen sind raumfest.
- *Terrestrisches Koordinatensystem*: ein Erdfestes System, das an die Bewegung der Erde angepasst ist;
- *Horizontsystem, lokaler Navigationsrahmen*: ein Koordinatensystem, das den Ursprung auf der Erdoberfläche hat; Das System wird zum Navigieren auf der Erdoberfläche benutzt.
- *Körpersystem*: ein individuelles, körperbezogenes System, dessen Ursprung sich an einem festgelegten Punkt im Objekt, bzw. Körper befindet;

Der relevante Bereich im Rahmen dieser Arbeit ist ein lokales Verkehrsgeschehen in einem Umkreis von wenigen hundert Metern bis einem Kilometer. An dieser Stelle wird mit dem Vernachlässigen der Erdkrümmung eine Vereinfachung getroffen.

2.1.2. Verfahren zur Positionsbestimmung

Das wesentliche Ziel einer Positionsbestimmung ist das Festlegen eines momentanen Ortes von einem bewegten Objekt zu einem fixen Punkt. Letzterer hat also bereits einen bestimmten Ort mit Koordinaten. Ausgehend von diesem Punkt können mit messtechnischen, mathematischen Verfahren die unbekannt Punkte bestimmt werden. In den folgenden Abschnitten sind Methoden zur Positionsbestimmung - wie sie in dieser Arbeit untersucht werden bzw. Anwendung finden - beschrieben.

Triangulation

In der Geodäsie, der Wissenschaft der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche, findet die Triangulation als wichtiges Messverfahren Anwendung. Aber nicht nur für die Vermessung von statischen Landschaften und sich in ihr befindlichen Gebäuden, sondern auch für die Bestimmung eines Ortes von bewegten Objekten, ist diese Methode nützlich. Durch die Messung der Winkel ausgehend von einer Basislänge zwischen zwei Punkten, kann der dritte Punkt des Dreiecks bestimmt werden. Mit trigonometrischen Funktionen und im Speziellen mit Hilfe des Sinussatzes kann der Bezug zwischen Winkeln und Dreiecksseiten hergestellt werden. Die folgende Formel 2.1 beschreibt dies.

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} \quad (2.1)$$

Dazu verdeutlicht die Abbildung 2.1 den Bezug von Winkeln und gegenüberliegenden Dreiecksseiten in Hinblick auf den Sinussatz. Letzterer findet zudem in der Funkpeilung Anwendung. Im nächsten Abschnitt wird dieses Gebiet weiter beschrieben.

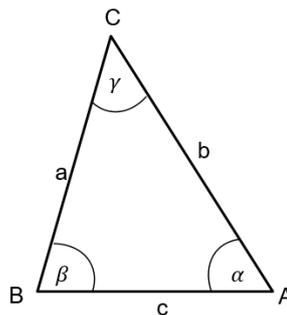


Abbildung 2.1.: Triangulation mit Dreieckswinkeln und -seiten nach dem Prinzip [18], [46]

Funkpeilung und Funkortung

Bei der Funkpeilung wird die Methode der Triangulation angewandt, um die Richtung von Funkwellen zu bestimmen. Um die Richtung eines Senders festzustellen, wird der geografische Norden als Bezugspunkt gewählt. Der Winkel von Norden aus zum Objekt der Peilung ist der Azimutwinkel. Zur Funkpeilung gehören unter anderem die Interferometer- und Doppelperilung. Bei der Interferometerpeilung wird die Phasenbeziehung von mehreren gleichartigen Einzelantennen genutzt, um eine Richtung zu bestimmen. Die Dopplerpeilung funktio-

niert mit einer bewegten Empfangsantenne mit der der Dopplereffekt¹ genutzt werden kann. Die Empfangsantenne dreht sich periodisch mit einer Rotationsfrequenz im Kreis. Bei einer eintretenden Raumwelle erscheint die Antennenbahn als Ellipse. Um ein aufmoduliertes, niederfrequentes Signal vom Dopplereffekt behafteten Signal zu unterscheiden, nutzt man eine stehende Antenne als Referenz [33].

Mit Hilfe der Funkortung kann der Standort eines Objektes bestimmt werden. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist GNSS. Das Grundprinzip beruht auf dem Bestimmen von Laufzeit bzw. Laufzeitdifferenzen von Funksignalen, die von Satelliten abgestrahlt werden.

Multilateration

Das Bestimmen einer Position ist auch über Multi- bzw. Trilateration möglich. Um einen Punkt in einer Ebene eindeutig orten zu können, braucht es hier mindestens drei Anker von denen aus die Abstände zum unbekanntem Punkt gegeben sein müssen. Die Anker haben bekannte Referenzpunkte im Raum. Sind mindestens vier Anker bei der Abstandsmessung involviert, lässt sich die Position auch im dreidimensionalen Raum zuordnen, sofern der vierte Anker aus der Ebene heraustritt. Die Schnittpunkte aller Abstände ist der Ort des Punktes mit bestimmbarer Toleranz. Weitere Schnittpunkte können durch Kausalitätsprüfungen ausgeschlossen werden. Über Laufzeitmessungen elektromagnetischer Signale sind die Distanzen bestimmbar. Die Abbildung 2.2 verdeutlicht das Prinzip in einer Ebene.

Die Gleichung 2.2 zeigt den Weg zur Berechnung des Schnittpunktes der drei Kreise unter Verwendung der euklidischen Distanz. Durch Auflösung der Gleichung für jeden Punkt P_i , $i = 1..3$ lässt sich der Punkt $D(x_D, y_D)$ bestimmen.

$$s_{DP_i} = \sqrt{(x_i - x_D)^2 + (y_i - y_D)^2} \quad (2.2)$$

Unter fehlerfreien Beobachtungen liefert diese Methode eine eindeutige Positionsbestimmung. Durch Ungenauigkeiten bei der Distanzmessung aufgrund von Messfehlern können mehrere Schnittpunkte entstehen. Dies führt zu einem überbestimmten System. Zur Lösung eines solchen Gleichungssystems können verschiedene, aus der linearen Algebra bekannte Verfahren genutzt werden. Ein Beispiel ist die Optimierungsmethode der kleinsten Fehlerquadrate. Diese Methode beruht auf der Minimierung des Verbesserungsvektors $v = A\tilde{x} - b$, wobei \tilde{x} die wahre Lösung repräsentiert. Damit v minimal wird, muss also das Ausgleichsproblem $Ax \approx b$ gelöst werden [20]. Mehr zum Thema Fehler und Ausgleichsrechnung wird im Abschnitt 2.7 angeschnitten.

¹ *Dopplereffekt*: Entdeckung durch den österreichischen Physiker Chr. Doppler, dass Frequenz und Wellenlänge einer Wellenerscheinung sich ändern, wenn Sender und Empfänger sich relativ zueinander bewegen [18].

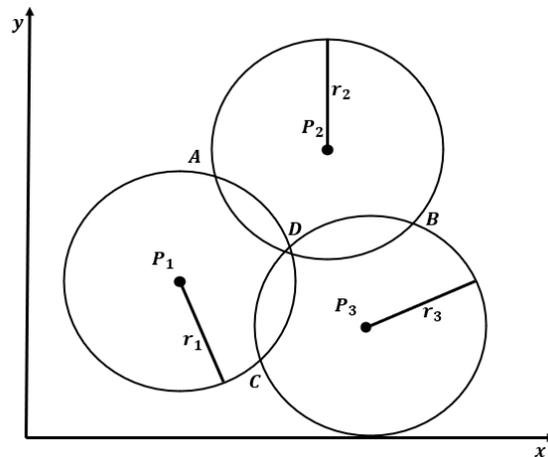


Abbildung 2.2.: Trilateration in einer Ebene - Schnittpunkt D ist der gesuchte, zu bestimmende Punkt. Die Schnittpunkte A, B und C werden durch Prüfung ausgeschlossen [20].

Laufzeitverfahren - Time of Flight

Das Laufzeitverfahren ist eine Messung der Zeit, die ein Objekt, Teilchen oder Welle braucht, um eine bestimmte Distanz in einem Medium (z.B. Luft) zu durchlaufen. Es lassen sich zwei Möglichkeiten ableiten, diese Zeit zu messen [38].

- **Time of Arrival, kurz ToA:**

Nutzung der absoluten Ankunftszeit eines Signals beim Empfänger. Mit der Methode ist auch eine Lokalisierung möglich.

- **Time Difference of Arrival, kurz TDoA:**

Messen der Zeitdifferenz von Signalen mehrerer Initiatorn beim Empfänger, um aus den verschiedenen, bestimmten Distanzen die Position des Empfängers ermitteln zu können.

Ziel dieser Ranging² Methode ist es, die Distanzen zwischen einem Zielobjekt und Basisstationen zu bestimmen. Für eine eindeutige Lokalisierung im 2D-Raum sind wie aus dem Abschnitt 2.1.2 bekannt, mindestens drei Entfernungsmessungen zwischen unterschiedlichen Basisstationen und dem Zielobjekt erforderlich. Die Abbildung 2.3 verdeutlicht das Prinzip der Distanzbestimmung über das ToF-Verfahren. Demnach bewegt sich ein vom Initiator³ (A) ausgesandtes Signal mit annähernder Lichtgeschwindigkeit durch die Luft der Erdatmosphäre und trifft auf einen Responder⁴, der das Signal beantwortet. Mathematisch ergibt sich

² *Ranging*: engl. für Entfernungsmessung

³ *Initiator*: engl. für Veranlasser, Urheber

⁴ *Responder*: engl. für der Antwortende

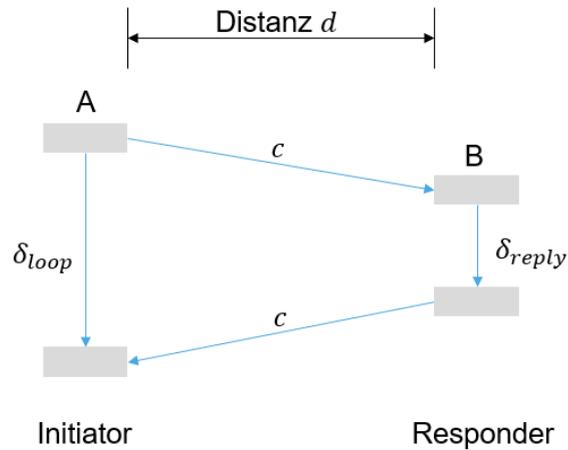


Abbildung 2.3.: Flugzeitmessungen über Auswerten der Zeitstempel eines beantworteten Signals beim Initiator. Das Verfahren wird auch *single sided two way ranging* bezeichnet. (SS-TWR) (eigene Abb., Prinzip nach [38])

für die Distanzberechnung mit der Lichtgeschwindigkeit c und

$$t_{AB} = \frac{\delta_{loop} - \delta_{reply}}{2} \quad (2.3)$$

schließlich:

$$d = c \cdot t_{AB} \quad (2.4)$$

Der Initiator kennt die Zeitverzögerungen δ_{loop} und δ_{reply} . Erstere ist die Zeit, die zwischen Senden und Empfangen beim Initiator bestimmt wird. δ_{reply} ist die Zeit, welche der Responder zum Antworten benötigt. Das in der Abbildung 2.3 veranschaulichte Verfahren findet unter anderem auch beim Ultrabreitband-Ranging statt. Alleine durch die Bestimmung einer Distanz lässt sich jedoch keine Position ermitteln. Die folgende Technik schafft dafür allerdings Abhilfe.

Angle of Arrival

Der auf Englisch bezeichnete „Angle of Arrival“ (AoA), bzw. auf Deutsch „Ankunftswinkel“, ist der Winkel, unter dem ein Funksignal am Empfänger ankommt. Die Abbildung 2.4 verdeutlicht dies. Hier ist der Ankunftswinkel im zweidimensionalen Raum der Winkel zwischen der y-Achse und dem Funksignaldistanzvektor als θ' angegeben. Die Abbildung 2.5 zeigt den Weg zur Bestimmung des AoA θ .

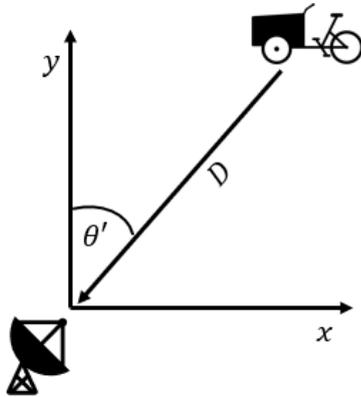


Abbildung 2.4.: Gegenwinkel als Ankunftsrichtungswinkel beim Empfänger; (eigene Abb., Prinzip nach [45])

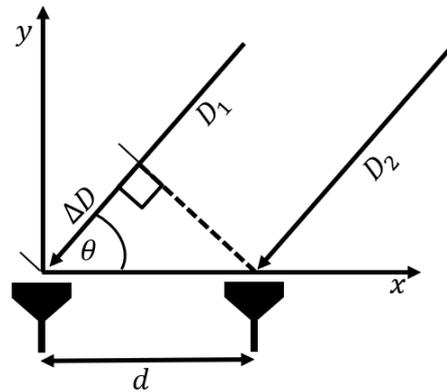


Abbildung 2.5.: Bestimmung des AoA über die Phasendifferenz zweier Antennen; (eigene Abb., Prinzip nach [45])

Mit Hilfe der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ eines empfangenen Signals kann dieser Winkel an der Empfängerseite durch ein Array aus Antennen bestimmt werden [45]. Diese Differenz zwischen den Antennen wird berechnet mit:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\Delta D}{c} = 2\pi \cdot \frac{d \cdot \cos(\theta)}{\lambda} \quad (2.5)$$

Der Abstand d mit dem die Antennen voneinander entfernt liegen, ist bekannt und muss weniger als $\lambda/2$ betragen, um Alias-Effekte⁵ zu vermeiden [31]. Bei einer Übertragungsfrequenz von 5 GHz dürfte der Antennenabstand mit $\lambda = \frac{c}{f}$ [18]

$$d < \frac{\lambda}{2} \approx 30\text{mm}$$

nicht überschreiten. Es ergibt sich mathematisch der AoA θ zu:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{2\pi \cdot d}\right) \quad (2.6)$$

⁵Alias-Effekt: Ein Begriff aus der Signaltheorie, der Fehler bei der Abtastung eines Signals beschreibt, wenn die Nyquist-Frequenz ($f_{\text{signal}} < f_{\text{nyquist}} = \frac{f_{\text{abtastet}}}{2}$) als Abtastbedingung verletzt wurde, vgl. [26] S. 236.

2.2. Technologien zur Positionsbestimmung

In den folgenden Abschnitten werden die in dieser Arbeit angewandten Technologien zur Lokalisierung beschrieben. Als globale Ortungstechnologie ist GNSS nicht wegzudenken. Als lokale Ortungsmöglichkeit wird eine Ortung mit Ultrabreitband vorgestellt. Des Weiteren wird eine inertielle Messeinheit zur Beobachtung der Bewegung eines Objektes als Kontrollsystem für eine Positionsbestimmung vorgestellt.

2.2.1. GNSS

Globale Navigationssatellitensysteme sind passive Systeme bei denen ein Nutzer mithilfe eines Empfängers Satellitensignale empfängt und dadurch seine Position, Geschwindigkeit und eine Zeitinformation mitgeteilt bekommt. Die Bestimmung der Position erfolgt durch das Messen der Strecke zwischen Empfänger und Satelliten. Die Berechnung findet dabei im Empfänger statt. Der im Orbit stationierte Satellit sendet zu nominell gleichen Zeitpunkten eine Abfolge von Signalen aus, deren Struktur im Empfänger bekannt ist. Der Empfänger erzeugt zu den gleichen Zeitpunkten gleiche Signale. Da die Signale vom Satelliten eine gewisse Zeit unterwegs sind, kommen diese zeitversetzt beim Empfänger an. Diese Zeitversetzungen zwischen den Signalen ΔT_i ($i = 1 \dots$ Anzahl der empfangenen Satellitensignale) werden bestimmt. Berechnet man zu den Zeitversetzungen die Geschwindigkeit $\Delta T \cdot v$ ($v =$ Ausbreitungsgeschwindigkeit der Satellitensignale in der Atmosphäre), so ergeben sich die Entfernungen zwischen den Satelliten und dem Empfänger. Für die Berechnung der Empfängerposition müssen die Satellitenpositionen im Empfänger bekannt sein. Dafür wird davon ausgegangen, dass zu jedem gewünschten Zeitpunkt die Informationen in den Satellitensignalen Auskunft über die Satellitenkoordinaten geben können [18]. Wie aus dem aus Abschnitt 2.1.2 bekannten Prinzip funktioniert die Positionsbestimmung also durch Bestimmung der Laufzeiten zwischen Sender und Empfänger und der daraus abgeleiteten räumlichen Distanzen. Interessant zu erwähnen ist die für alle GNSS gültige Gleichung zur Ortsbestimmung, die wie folgt lautet:

$$(\Delta T_i \cdot v + \Delta t \cdot v)^2 = (X_i - X_E)^2 + (Y_i - Y_E)^2 + (Z_i - Z_E)^2; i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.7)$$

Die Variablen aus der Gleichung 2.7 haben die folgenden Bedeutungen:

- ΔT_i : gemessene Laufzeiten der Satellitensignale
- v : Ausbreitungsgeschwindigkeit der Satellitensignale
- X_i, Y_i, Z_i : bekannte Satellitenkoordinaten

- X_E, Y_E, Z_E : unbekannte Empfängerkoordinaten
- Δt Empfängeruhrenfehler

Aus der Gleichung wird zudem ersichtlich, warum vier Satelliten für herkömmliche Empfänger zur ausreichend genauen Positionsbestimmung notwendig sind. Es sind vier Unbekannte für vier Gleichungen. Der Unterschied zu der aus Gleichung 2.2 bekannten Empfängerpositionsbestimmung ist - neben der dritten Dimension - die Variable Δt . Mit ihrer Einführung wird ein unbekannter Uhrenfehler akzeptiert. Die im Empfänger ermittelte Strecke ist aufgrund des Fehlers nicht die tatsächliche Strecke und wird daher *Pseudostrecke* genannt. Die Anforderungen an die Laufzeitmessung im Empfänger sind dermaßen hoch, dass eine hochpräzise Positionsbestimmung auch mit hohen Investitionskosten nicht umsetzbar ist [18]. Die Abbildung 2.6 verdeutlicht das Prinzip der Satellitenortung.

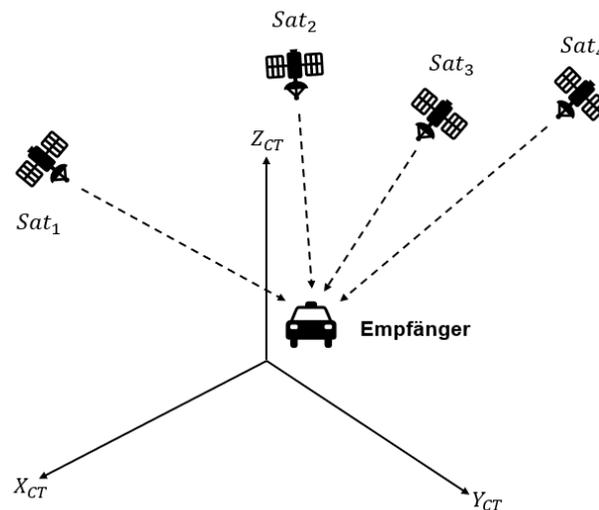


Abbildung 2.6.: Satelliten-Empfänger Modell (Abb. nach [18]): 4 Satelliten und 1 Empfänger zur Positionsbestimmung von letzterem. Die Signallaufzeiten werden bestimmt, um eine räumliche Distanz zwischen Satelliten- und Empfänger-Seite und somit eine Positionsbestimmung des Empfängers zu erhalten. Die Abkürzung „CT“ steht für *Conventional Terrestrial*.

Es wird zum Beispiel mit der bekanntesten GNSS-Technologie GPS eine durchschnittliche Genauigkeit bzw. ein *User Range Error* von $< 7.0m$ in 95% der Zeit erzielt [37].

Differentielle Ortung

Neben der herkömmlichen Ortung, welche Genauigkeiten im „Meterbereich“ ermöglicht, kann bei höheren Anforderungen an die Genauigkeit eine differentielle Ortung durchgeführt werden. Das Grundprinzip hierbei ist identisch. Durch etwaige Fehler wie Unkenntnis von Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale in der Erdatmosphäre oder ungenaue Bahndaten wird eine differentielle Ortung notwendig. Bei diesem Verfahren muss mit zwei Satellitenempfängern gearbeitet werden. Einer der beiden - der Referenzempfänger - ist auf einem bekannten Punkt platziert. Dieser Empfänger bestimmt seine Position immer wieder neu. So kann festgestellt werden, in welchem Umfang die Positionen voneinander Abweichen. Mit den Daten des Referenzempfängers kann der zweite Empfänger - auch „Rover“ genannt - seine Position genauer bestimmen und eventuelle Positionsfehler ausgleichen. Dafür wird davon ausgegangen, dass die Fehler bedingt durch Unkenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Satellitensignale in der Erdatmosphäre und unbekannte Bahndaten bei beiden Empfängern gleich sind. Mit diesem Verfahren und mit zusätzlicher Anwendung von aufwendigen Algorithmen, können Genauigkeiten im Millimeterbereich erreicht werden [18].

Störquellen von GNSS

Als weitere interessante Thematik sind Störquellen von GNSS zu benennen. Dabei sind nicht die entstehenden Ungenauigkeiten bedingt durch Sichtabdeckung, Multipfad oder Reflexionen gemeint, sondern externe, aktive Störeinflüsse. Im Folgenden sind einige nach [18] aufgelistet.

- Interferenzen, Natürliche Interferenzen / Funk Interferenzen:
Natürliche Interferenzen können zum Beispiel durch Sonneneruptionen hervorgerufen werden. Funkinterferenzen können unbeabsichtigt beispielsweise durch Nutzung des selben Frequenzbandes auftreten. Beabsichtigte Funkinterferenzen sind durch sogenannte „Jammer“ möglich.
- Störung durch gefälschte Signale:
Spoofing oder Meaconing sind Begriffe, die unter diese Rubrik fallen. Beide Techniken bedienen sich der Nachahmung des Originalsignals und Rücksendung. Dies hat eine Verwirrung des Urhebers zur Folge.
- Störung durch Systemausfall:
Die Vergangenheit hat gezeigt, dass Systemausfälle nicht auszuschließen sind. Am 1. April 2014 sendeten alle GLONASS-Satelliten beispielsweise falsche Navigationsdaten, wodurch ein Koordinatenfehler von bis zu ± 200 km in allen Richtungen auftrat. [18]

Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung

Die Abbildung 2.7 illustriert Fehler, die bei der Positionsbestimmung mit GNSS im urbanen Raum auftreten können. Hier sind die bekannten Phänomene wie Reflektionen an Hauswänden, Nichtsichtverbindung (NLOS) oder Mehrwegausbreitung angegeben. Diese entsteht dann, wenn eine direkte Sichtverbindung zum Empfänger existiert und zugleich Reflektionen auftreten. Dadurch sind mehrere Laufzeiten bzw. Strecken im Empfänger durch den selben Satelliten bekannt, was zu einer fehlerhaften Distanz- und damit Positionsbestimmung führt [18]. Die Abdeckung durch hohe Gebäude hat oft zur Folge, dass zu wenige Satelliten zur ausreichend genauen Datenermittlung vorhanden sind. Dies zeigt die Notwendigkeit anderer, lokaler Ortungsverfahren für urbane Räume.

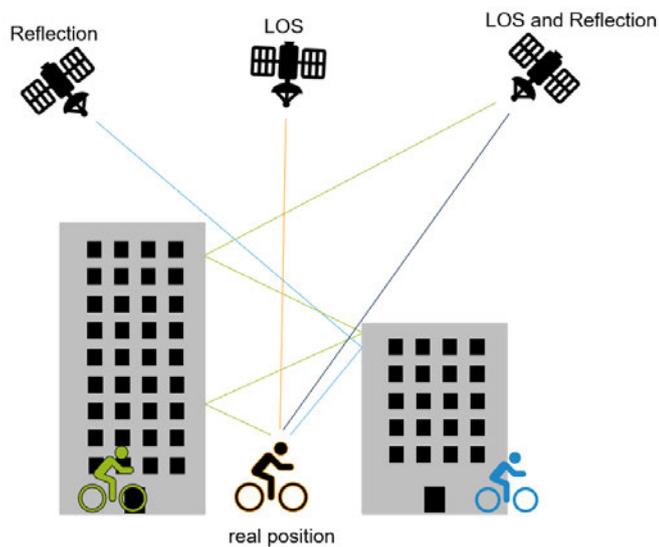


Abbildung 2.7.: GNSS Signallaufstörungen und -verzögerungen bedingt durch Abdeckung hoher Gebäude; eigene Darstellung, Prinzip nach [50]

2.2.2. Ultra Wideband

Ultra Wideband unterscheidet sich von anderen Funktechniken der Nahbereichsfunkkommunikation wie WLAN oder Bluetooth durch den Einsatz eines breiten Frequenzspektrums von mindestens 500 MHz bei sehr geringer Sendeleistung [36]. Klassische, schmalbandige Empfänger empfangen nur einen kleinen Teil des Frequenzspektrums, weswegen das UWB-Signal bei diesen im Rauschen untergeht. Der Vorteil dieser beschriebenen Funktechnik ist, dass sie andere Funkssysteme nicht stört und selbst den Frequenzbereich effizienter nutzt. Auch haben andere schmalbandige Funksignale einen vernachlässigbaren Störeinfluss, da diese im breiten Frequenzspektrum beim UWB-Empfänger untergehen. Die Signale werden nicht nach Frequenz, sondern nach Impulsform gefiltert. Durch die sehr kurzen Impulse im Zeitbereich und das resultierende breite Spektrum kann die Flugzeit des übertragenen Signals sehr genau bestimmt werden. Dies kann für Distanzmessungen zwischen Sender und Empfänger genutzt werden und ermöglicht die Bestimmung von Distanzen auf geringer Entfernung mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich. [34]. Die Abbildung 2.8 zeigt einen Vergleich von klassischen, schmalbandigen Signalen und einem im Frequenzband ausge dehnten UWB-Signal [23]. Gut erkennbar ist, dass dieses Signal im Rauschen des Leistungsdichtespektrums untergeht und dadurch nach entsprechender Rauschfilterung keine Störung für andere Frequenzbänder bewirkt.

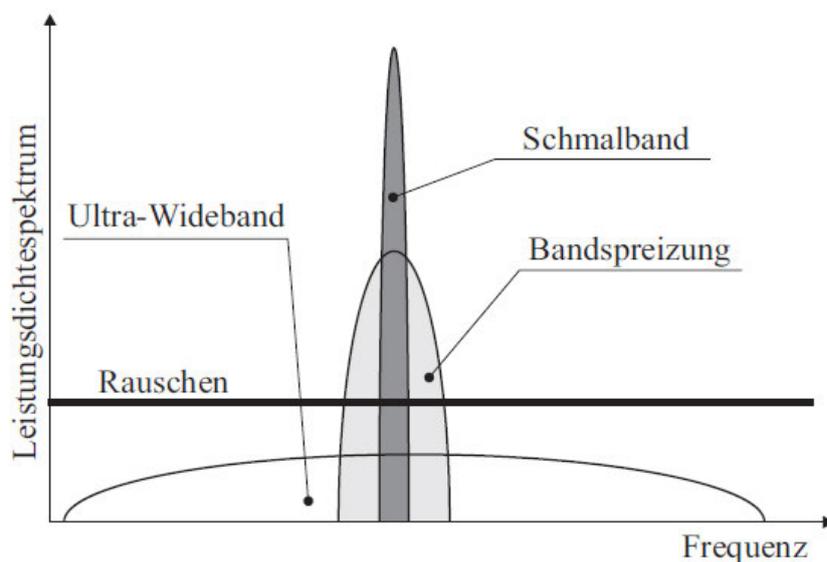


Abbildung 2.8.: Vergleich von schmalbandigen Frequenzbändern mit dem von Ultrabreitband [23].

Referenzpuls, Kodierung und Rahmen nach IEEE 802.15.4

Referenzpuls, Kodierung und Rahmen der Ultrabreitband-Kommunikation sind im IEEE Standard 802.15.4 spezifiziert [17]. Das in der Abbildung 2.10 gezeigte breite Frequenzspektrum entsteht durch den in der Darstellung 2.9 ausgesendeten charakteristischen Puls im Zeitbereich. Dieser entspricht einem oft gebrauchten Gauß-Puls mit der mathematischen Beschreibung:

$$p(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.8)$$

Die Variable A steht hierbei für die Amplitude, während σ die Varianz oder Spanne des Pulses repräsentiert [36]. Die Pulsform wurde durch das IEEE Komitee speziell so ausgewählt, dass das sich ergebende Spektrum über eine große Bandbreite konstant ist und an den Grenzen schnell abfällt. Die Sendeleistung ist zudem vom Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) reguliert. Für Frequenzen von 3,1 GHz bis 10,6 GHz ist die Leistungsdichte für den Innen- und Außenbereich auf -41,3 dBm/Mhz begrenzt [22].

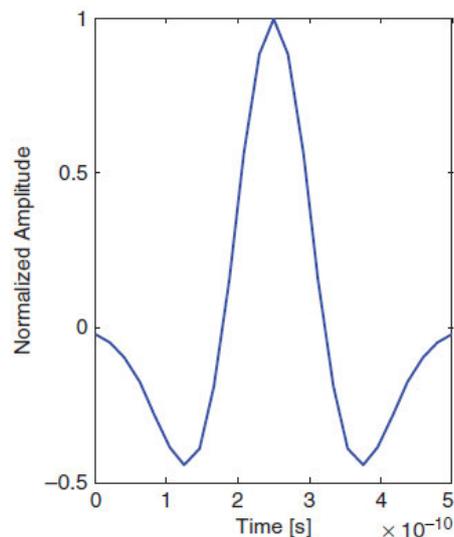


Abbildung 2.9.: Typische Ultrabreitband Pulsform des Signals im Zeitbereich [36].

Die Ultrabreitband Pulse folgen einem ternären Kodierungsschema, welches besagt, dass die Daten in drei verschiedenen Stadien übertragen werden. Zum einen existiert der normale Referenzpuls, der mit der Kodierung (+1) festgelegt ist. Des Weiteren gibt es einen Nullzustand ohne Energie (0) und einen um 180° gedrehten Zustand (-1). Im IEEE-Standard ist zudem der UWB Rahmen definiert [17]. Dieser besteht im Wesentlichen aus vier Teilen, die im Folgenden kurz angesprochen werden. Dieser Abschnitt befasst sich nicht vollständig mit der UWB Kommunikation, da diese sehr komplex ist.

- **Präambel:** Synchronisation
- **SFD:** Start of Frame Delimiter
- **PHR:** Physical layer(PHY) Header
- **PSDU:** Physical layer (PHY) Service Data Unit

Die Abbildung 2.10 zeigt die Struktur des UWB-Frames. Generell setzt sich ein UWB-



Abbildung 2.10.: Struktur eines UWB-Frames[17].

Datenpaket aus der Synchronisationsphase *SYNC* und der Datenübertragungsphase *DATA* zusammen. Zur ersten Phase gehören die Präambel und das SFD-Feld. Im Synchronisationsprozess wird ein Code erzeugt der 31 oder 127 Symbole des ternären Alphabets enthält. In diesem sind wichtige Empfangseinstellungen enthalten. Die zu verwendenden Codes sind ebenfalls im IEEE Standard 802.15.4 definiert. Der SFD- Teil beendet den Synchronisationsvorgang. Distanzmessungen werden für nicht-sichere Anwendungen in der Präambel durchgeführt. Zur Datenübertragung gehören die Felder *PHR* und *PSDU*. Das PHR-Feld enthält Informationen vom folgenden PSDU-Feld, das die eigentlichen Daten trägt. Ersteres gibt an, wie groß der Inhalt ist und mit welcher Datenrate dieser Übertragen wird. Die Datenraten können gemäß dem Standard 851 *kbit/s*, 6, 81 *Mbit/s* oder 27, 24 *Mbit/s* betragen. Bei einer Datenübertragungsrate von 27, 24 *Mbit/s* für die PSDU kann die Dauer der Übertragung eines gesamten UWB-Frames zwischen 49, 0 μs und 75, 1 μs - je nach Größe der Nutzdaten - betragen [32].

Distanzmessung mit UWB

Mit der Ultrabreitband-Technologie können Distanzmessungen über Messung der Time-of-Flight (ToF) des Funksignals vorgenommen werden. Ist die Flugzeit bekannt, wird die Distanz über Multiplikation von der Lichtgeschwindigkeit und der ToF ermittelt. Eine Distanzermittlung wird auch UWB-Ranging genannt und wird im Fall für UWB als Single-Sided Two-Way Ranging (Einseitige Zweiweg-Distanzermittlung) ausgeführt. Neben der einfachen, einseitigen Ranging Sequenz, bei der ein Initiator einen Poll ⁶ Request macht und diesen

⁶*poll*: engl. für ziehen

dann mit einer Antwort vom Responder ⁷ bestätigt bekommt, gibt es noch eine weitere Sequenzart. Jedwede Zeitreferenzunterschiede zwischen Initiator und Responder führen zu Berechnungsfehlern der Time of Flight. Um das zu vermeiden wird eine zweiseitige Zweiweg-Distanzermittlung (DS-TWR, Double Sided -Two way Ranging) ausgeführt [35]. Bei diesem Verfahren fängt der Initiator mit einem Poll Request an. Dieser wird vom Responder bestätigt und gleichzeitig führt er einen Poll-Request aus. Dieser wird wiederum vom Initiator bestätigt. Auf diese Weise kann die ToF in beiden Geräten gemessen und am Ende verglichen werden. Unterschiede werden damit kompensiert. Ein Nachteil dieser Methode ist der höhere Energieverbrauch.

Lokalisierung mit UWB

Zur Lokalisierung mit Ultrabreitband wird im Innenraum oft die TDoA-Methode (Time Difference of Arrival) verwendet. Hierbei sendet ein Initiator ein Datenpaket aus, das in den Ankern verarbeitet wird. Letztere senden keine Antwort zurück. Für die Lokalisierung mit der Methode sind vier Anker zur Vermeidung von Schnittpunktdoppeldeutigkeiten notwendig. Diese Methode basiert auf dem in Kapitel 2.1.2 besprochenem Verfahren der Multilateration. Die Genauigkeit dieser Methode wird im Zentimeterbereich unter Sichtbedingung angegeben ($\pm 10\text{cm}$) [34]. Eine andere Möglichkeit, um mit UWB eine Lokalisierung zu ermöglichen, ist die Verwendung des AoA (Angle of Arrival) in Verbindung mit einer Distanzermittlung. Diese im Abschnitt 2.1.2 bereits besprochene Methode, funktioniert im Fall von UWB mit Hilfe von Antennenarrays. Es werden weniger Geräte benötigt, allerdings kommen zusätzlich neben Fehlertoleranzen des Rangings noch Fehler bei der Winkelbestimmung dazu. Diese liegen auch im Zentimeterbereich unter Sichtbedingungen.

Sicht- und Nicht- Sichtverbindung

Die Sichtverbindung, oder auf Englisch, Line-Of-Sight (LOS), ist in der Nachrichtentechnik eine Funkübertragung mit direktem Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger. Dementsprechend ist Non-Line-Of-Sight (NLOS) eine Nachrichtentechnik bzw. ein Umstand für eine Funkübertragung ohne direkten Sichtkontakt. Die Umstände, ob die Übertragung eines Signals unter einer der genannten Bedingungen stattfindet, hat Auswirkungen auf die Genauigkeit beziehungsweise Fehleranfälligkeit der Distanzbestimmung mit UWB. Eine direkte Sichtverbindung ist immer vorteilhaft, da eine geringere Sendeleistung notwendig ist und die Messung genauer und eindeutiger (Mehrwegausbreitung) ist, als bei NLOS. Nichtsichtverbindungen ziehen zur Kompensation der Nachteile einige Anpassungen mit sich. Zum Beispiel

⁷ Responder: engl. Beantworter, ein sich in der Kommunikationstechnik aus dem Englischen etablierter Begriff

kann der Sendemast erhöht oder die Sendeleistung verstärkt werden. Um Fehler zu vermeiden gibt es zudem Lösungen zur Identifizierung von NLOS und Minderung der dadurch entstehenden Ungenauigkeiten. Es existieren auch weitere Ansätze, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, um gegen die erschwerte Positionsbestimmung bei NLOS-Bedingungen anzugehen [49].

2.3. V2X Kommunikation

Die Vehicle-to-Anything (V2X) Kommunikation ist eine WLAN-Technik auf Basis des 802.11p IEEE Standards zur Vernetzung von Fahrzeugen (Vehikeln) zu einer Reihe anderer stationärer und mobiler Stationen. Sie findet bereits heute Einsatz. Mit der Technologie können ausgestattete Fahrzeuge untereinander drahtlos verschiedene Daten austauschen, um so beispielsweise mit Hilfe der Informationen den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit zu verbessern.

2.3.1. IEEE 802.11p

Aus dem Standard 802.11a des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ist 2010 der erweiterte WLAN-Standard 802.11p entstanden [16]. Im Gegensatz zur cellularen Variante C-V2X, bei der die Kommunikation über das Mobilfunknetz läuft, funktioniert die Übertragung von V2X über das WLAN (Wireless Local Area Network). Die Stationen bauen jeweils ein WLAN Netz auf und nutzen dabei das 5,9GHz Frequenzband im Bereich von 5,850GHz – 5,925GHz für die Fahrzeugkommunikation in Europa. Die Daten werden mit einer Geschwindigkeit von bis zu 27Mb/s übertragen. Der Standard beschreibt die physikalische Schicht und die Verbindungssicherung von V2X. Es wird ein Ad-Hoc-Netzwerk⁸ aufgebaut, bei der eine Verbindung ohne Basisstation läuft. Es gibt keine exklusive Kopplung zwischen zwei Teilnehmern, sondern jeder kann mit jedem kommunizieren. So können sehr schnell Verbindungen aufgebaut und Daten übertragen werden. Diese Schnelligkeit der Kommunikation ist notwendig, da sich Fahrzeuge, die schnell fahrend in entgegengesetzter Richtung unterwegs sind nur sehr kurz in Reichweite befinden. Die Sicherheit wird im Vorfeld über das Einbringen von Sicherheitszertifikaten über eine sogenannte *Public Key Infrastructure* ermöglicht [41]. Verfügt ein System nicht über die aktuellsten Zertifikate, kann eine Kommunikation nicht stattfinden. Entsprechende Protokolle werden in höheren Netzwerkebenen bei Bedarf integriert. Das wesentliche Ziel des Standards ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Damit einhergehend müssen Anforderungen wie eine hohe Zuverlässigkeit und niedrige Latenz erfüllt werden.

⁸ *Ad-Hoc-Netzwerk*: Funknetz, bei dem sich die Geräte schnell und direkt miteinander verbinden.

2.3.2. Intelligentes Verkehrssystem

Das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) bezeichnet den Standard 802.11p oder pWLAN auch ITS-G5 (Intelligent Transport System). G5 steht dabei für den 5-GHz-Bereich. Ziel des Institutes ist es, international anerkannte Normen und Standards für den Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie zu etablieren. In die Rubrik des C-ITS (Cooperative-ITS) fallen dabei Normen, die helfen sollen, die Sicherheit auf den Straßen und das Erreichen des Weges zum autonomen Fahren zu ermöglichen. Dies soll basierend auf dem Austausch von Informationen über direkte und drahtlose Kommunikation für kurze Reichweiten realisiert werden. Das ETSI beschreibt unter dem ITS-Standard Nachrichtenprotokolle für den Austausch bestimmter Informationen [25]. Einige Beispiele solcher Nachrichtenarten lauten:

- **CAM - Cooperative Awareness Message**
Diese Nachricht enthält Informationen über das Fahrzeug, wie zum Beispiel die Art des Fahrzeugs, die Position, Abmessungen und mit welcher Geschwindigkeit es in welche Richtung unterwegs ist.
- **DENM - Decentralized Environment Notification Message**
Diese Nachricht enthält Informationen über potentielle Gefahren. Sie wird ausgelöst, wenn eine Gefahr in Reichweite des Fahrzeugs besteht. Zum Beispiel kann die Position einer Ölspur mit Hilfe des Nachrichtentyps bekanntgemacht werden.
- **SPATEM - Signal Phase and Timing Extended Message**
Der Nachrichtentyp wird von der Infrastruktur ausgesendet, um die Signalphasen und Signalzeiten anzugeben. Auf Basis dessen können Geschwindigkeitsvorschläge für sich einer Ampel nähernde Fahrzeuge gegeben werden, um die Effizienz zu steigern.
- **MAPEM - MAP (topology) Extended Message**
Diese Nachricht enthält Informationen über die geografische Beschaffenheit von Straßen bzw. Fahrspuren. Zudem beinhaltet sie die Manöver-Liste der Kreuzung. Es existiert eine MAPEM pro Kreuzung.
- **SREM - Signal Request Extended Message**
Inhalt dieser Nachricht ist eine Abfrage für eine mögliche Priorisierung an einer Ampel, Brücke oder Schranke.
- **SSEM - Signal request Status Extended Message**
Dieser Nachrichtentyp enthält unter anderem den Status des Signal Requests.

Im ITS-Standard ist auch festgelegt, dass eine maximale Ende-zu-Ende Latenzzeit für CAM-Nachrichten von 100 ms nicht überschritten werden darf [24].

MAP Nachrichten

Besonders relevant für diese Arbeit, ist die MAPEM-Nachricht. Sie enthält wichtige Positionsinformationen über eine Kreuzung, für die eine MAPEM gilt. Zur Definition der Datenstruktur wird eine solche Nachricht im plattformunabhängigen ASN.1-Format (Abstract Syntax Notation One) beschrieben. Die Abbildung 2.11 zeigt den Aufbau der MAP-Nachricht über eine pcap⁹-Datei. Der Header ist bei allen Nachrichtentypen einer Station oder eines Fahrzeugs

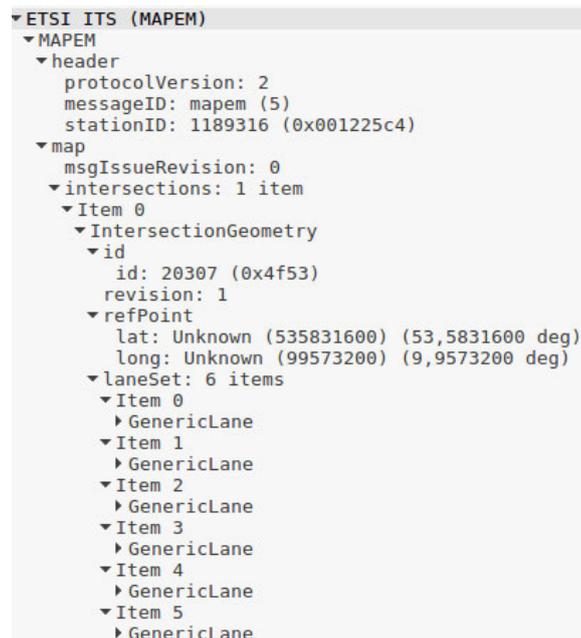


Abbildung 2.11.: Inhalt einer pcap-Datei für die MAPEM; (eigene Abb.)

vorhanden und identisch. Dieser enthält die Protokollversion (*protocolVersion*), Nachrichtenidentifikationsnummer (*messageID*) und die Stationsidentifikationsnummer (*StationID*). Diese existiert einmalig für ein Fahrzeug. Die *map*-Sektion enthält die Informationen über die Kreuzungen (*Intersections*) der Station. Die Intersection-Information beinhaltet die Anzahl der Kreuzungen, GNSS-Koordinatenreferenzpunkt, Fahrspuren mit deren Koordinaten und mögliche Fahrmanöver.

2.4. MQTT - Kommunikation

Das Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) - Netzwerkprotokoll ist ein sehr leichtgewichtiger Standard für den Austausch von Daten für IoT (Internet of Things) - Anwendungen

⁹pcap: Dateiformat eines Mitschnitts des Netzwerkverkehrs über eine freie Programmierschnittstelle

[10]. Die Kommunikation verläuft über einen Broker, der als eine Art zentraler Server die Nachrichten aufnimmt und verteilt. Sensoren fungieren hier als Herausgeber (Publisher) von Informationen und Aktuatoren oder Anzeigegeräte nehmen die Rolle der Abonnenten dieser Information ein. Sie können die herausgegebenen Informationen zum Anzeigen oder Weiterverarbeiten nutzen. Eine möglicher Publisher wäre ein Temperatursensor, der die aktuelle Temperatur veröffentlicht. Diese Information geht über den Broker zu den Subscribern. Dies kann zum Beispiel ein Temperaturregler sein oder eine Applikation auf einem Smartphone zum Anzeigen der Temperatur. Die Abbildung 2.12 verdeutlicht das Prinzip des Kommunikationsprotokolls.

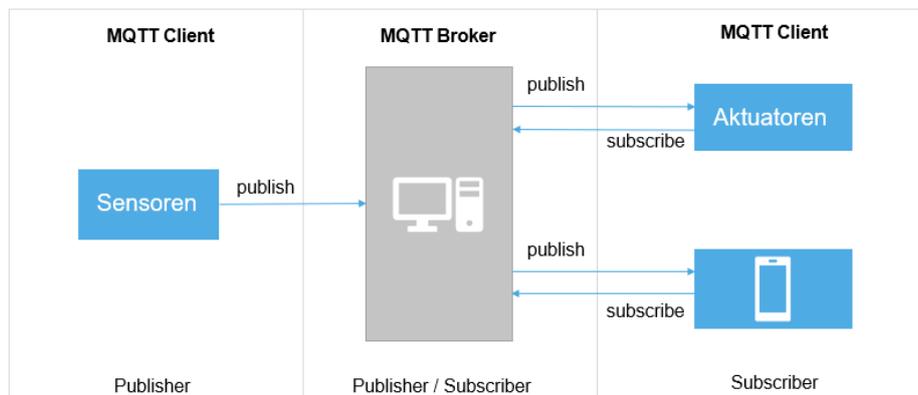


Abbildung 2.12.: Verdeutlichung des Prinzips der MQTT Kommunikation; eigene Darstellung, Prinzip nach [10]

2.5. Inertiale Messeinheit

Eine inertielle Messeinheit (IMU) besteht in der Regel aus einer Kombination aus Beschleunigungs- und Drehratensensoren in räumlicher Anordnung. Die IMU wird in inertialen Navigationssystemen verwendet. Ein anderer Begriff für ein solches System ist Trägheitsnavigationssystem. Der Name leitet sich vom Prinzip der Massenträgheit der heutigen mikroelektromechanischen Bauteile in einer IMU ab. Die Fertigung von solchen MEMS-Bauteilen ist sehr aufwendig und findet in Reinräumen statt. Bei einer Kombination aus zwei räumlichen inertialen Sensoren spricht man von 6-DOF (6 Degrees of Freedom). Es existieren auch IMUs mit zusätzlichen Magnetometern und einem Temperatursensor. Dann spricht man von 9-, bzw. von 10-DOF. Die Einsatzgebiete von IMUs reichen von Flugzeugen, Robotik bis hin zur Bildstabilisierung für eine Kamera. Dabei geht es immer um die Bewegungsdetektion. Im Folgenden werden die einzelnen inertialen Sensoren einer 9-DOF-IMU beschrieben, da sie im Rahmen dieser Masterarbeit zum Einsatz kommt.

Beschleunigungssensor

Um die Beschleunigung in eine Richtung zu messen dient eine an Federn aufgehängte Masse, welche bei einer beschleunigten Bewegung eine Auslenkung zur Folge hat. Diese wird mit Hilfe eines Wegaufnehmers gemessen. Letzterer kann beispielsweise einer kapazitiven Ausführung mit der Eigenschaft eines Plattenkondensator entsprechen. Ein Blick auf die Formel zur Bestimmung der Kapazität eines Plattenkondensators in 2.9 verdeutlicht, dass eine Veränderung des Abstandes d zwischen den Platten eine Kapazitätsänderung zur Folge hat. Über letztere lässt sich die Spannung ableiten und messen.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (2.9)$$

Als mikroelektromechanisches Bauteil wird ein Beschleunigungssensor häufig in einer Kammstruktur gefertigt. Die Abbildung 2.13 verdeutlicht diesen Aufbau. Zu erkennen sind die Massen m_i , Dämpfungskonstanten d_i und Federkonstanten k_i mit $i = 1, \dots, 4$. C ist die positionsabhängige Kapazität des Wegaufnehmers. Das dynamische Verhaltensprinzip dieses Systems entspricht einem Masse-Feder-Dämpfer-Systems [42].

Gyroskop

Ein Gyroskop wird zum Messen der Drehbewegung eines Objekts benutzt. Als mikroelektromechanisches Bauteil misst es die Winkelgeschwindigkeit in Grad pro Sekunde ($^\circ/s$). Das Prinzip dahinter ist ähnlich wie bei einem Beschleunigungssensor. Es existiert eine Masse,

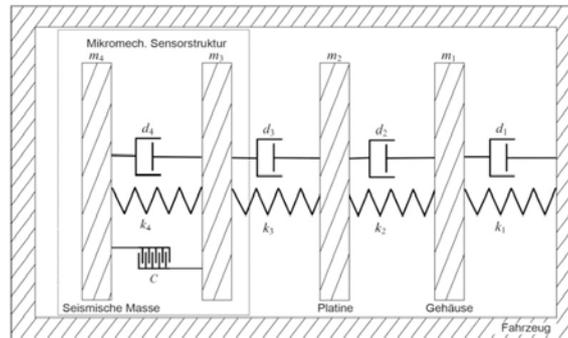


Abbildung 2.13.: Schematische Darstellung eines Beschleunigungssensor im Fahrzeug (vgl. [42] S. 123).

die durch Bewegung ihre Lage verändert. Hierbei handelt es sich jedoch um eine auf einer Kreisscheibe platzierte Masse, die durch die Corioliskraft bewegt wird, wenn sich die Kreisscheibe dreht [42].

Magnetometer

Das Magnetometer misst das Erdmagnetfeld meistens mit Hilfe des Hall-Effekts. Dieser Effekt besagt, dass sich eine Spannung ausbildet (Hall-Spannung), die senkrecht zur Stromfluss- als auch zur Magnetfeldrichtung steht, wenn ein stromdurchflossener Leiter sich in einem homogenen Magnetfeld befindet. Mit der Stromstärke I , der magnetischen Feldstärke B , der Dicke d des Leiters und der vom Material abhängigen Hall-Konstanten R_H berechnet sich die Hall-Spannung zu [42]:

$$U_H = R_H \cdot \frac{I}{A} \cdot B \cdot d \quad (2.10)$$

Lagebestimmung mit Hilfe einer IMU

Mit den zuvor beschriebenen Inertialsensoren einer IMU lässt sich die Orientierung eines Objektes bezogen auf ein Referenzsystem bestimmen. Das körpereigene Bezugssystem muss über Rotationsmatrizen in das Referenzsystem übertragen werden. Die möglichen bestimmbar Winkel werden als Roll-, Nick- und Gierwinkel bezeichnet.

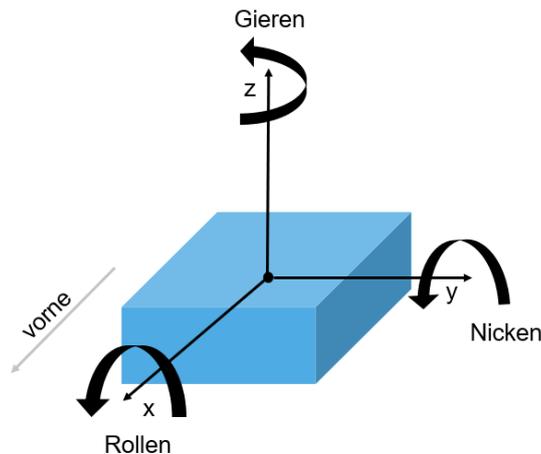


Abbildung 2.14.: Orientierungsbestimmung über Drei (Euler-) Winkel für Rollen (x-Achse), Nicken (y-Achse) und Gieren (z-Achse) im Körper-eigenen Referenzsystem; eigene Darstellung, Prinzip nach [4]

2.6. Sensorfusion

Der Einsatz von nur einem Sensor führt meist zu einer ungenauen Beschreibung von Position und Bewegung eines zu beobachtenden Objektes. dafür verantwortlich sind die verrauschten Messergebnisse eines Beschleunigungssensors, die Empfindlichkeit eines Magnetometers oder der Drift-Fehler des Gyroskops.

2.6.1. Komplementärfilter

Durch ein Komplementärfilter lassen sich zum Beispiel Sensordaten vereinen und ihre Schwächen kompensieren. Diese Filterart besteht aus einem Tiefpassfilter und komplementär dazu aus einem Hochpassfilter. Am Ende werden die Berechnungen beider Filter addiert und zusammengefügt. Das hochfrequente Rauschen eines Beschleunigungssensors kann mit einem Tiefpassfilter minimiert werden. Für das Gyroskop gilt das komplementäre Prinzip. Niederfrequentes Rauschen kann hier durch einen Hochpassfilter verringert werden [29]. Auf diese Weise kann die Lage einer IMU präziser bestimmt werden.

2.6.2. Kalman-Filter

Ein oft genutztes Werkzeug, wenn es um die Bestimmung von Zieldaten aus rauschbehafteten Sensor-Messungen geht, ist das Kalman-Filter. Der Begriff ist auf seinen Erfinder,

Rudolph E. Kalman, zurückzuführen, der diesen im Jahr 1960 in einem Paper vorgestellt hat. Durch ihn kann man den fortschreitenden unbekanntem Zustand eines dynamischen Systems für diskrete Zeitwerte schätzen. Im Wesentlichen besteht der Kalman-Filter aus mathematischen Gleichungen, die es erlauben sollen, in iterativen Vorhersage- und Update-schritten den unbekanntem Zustand zu ermitteln. Im Update wird eine gemachte Vorhersage mit der Beobachtung aus den Messwerten verglichen. Der geschätzte, neue Zustand soll insofern optimal sein, als dass der Kovarianz-Fehler in dem Fall minimiert wurde [48].

Mit Hilfe der mathematischen Gleichungen hinter dem Kalman-Filter wird die Schätzung eines Modells mit Eintreffen der nächsten Messung entsprechend korrigiert. Wie stark die Vorhersagen durch das Systemmodell im Vergleich zu der Messung eingehen, ermittelt das Kalman-Filter über (Ko-)Varianzen für Systemzustand und Messung. Je niedriger die Varianz einer Größe geschätzt wird, desto stärker vertraut das Kalman-Filter dieser Größe. Beim linearen Kalman-Filter wird davon ausgegangen, dass das Prozess- und Messrauschen einer Gaußverteilung entspricht. Für nichtlineare Modelle, bei denen das Rauschen nicht Gaußverteilt ist, muss ein erweitertes Kalman-Filter verwendet werden.

2.6.3. Lineares Kalman-Filter

Das lineare Modell lässt sich wie in der Abbildung 2.15 gezeigt, darstellen. In diesem Fall wird die Dynamik des Pedelecs mit der Übergangsgleichung x_k und der Beobachtungsgleichung y_k beschrieben. Durch das Modell des Pedelecs kann der Zustand vorhergesagt werden. Die Variable \hat{x}_k beschreibt den vorhergesagten Schätzwert.

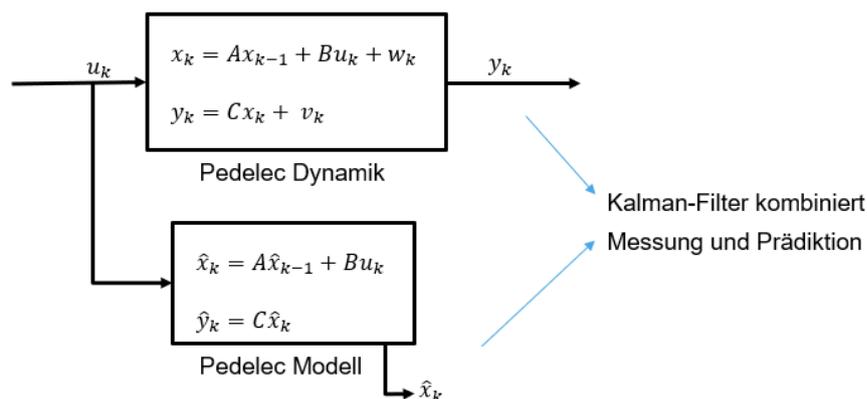


Abbildung 2.15.: Die allgemeine Zustandsdarstellung des Kalman-Filters; eigene Darstellung, Prinzip nach [48]

Die Parameter haben die folgende Bedeutung.

- **A**: Zustandsübergangsmatrix
- **B**: Kontrolleingabematrix
- **C**: Beobachtungsmatrix
- w_k : Prozessrauschen
- v_k : Messrauschen

Prozess- und Messrauschen sind mit $p(w) \sim N(0, Q)$ mit der Kovarianzmatrix $Q = \sigma_w^2$ und $p(v) \sim N(0, R)$ mit $R = \sigma_v^2$, der Kovarianzmatrix des Messrauschens, normalverteilt. Die Abbildung 2.16 verdeutlicht das Prinzip der Ermittlung einer optimalen geschätzten Position durch die Kombination aus Messung und dem vorhergesagten Schätzwert mit normalverteiltem Rauschen.

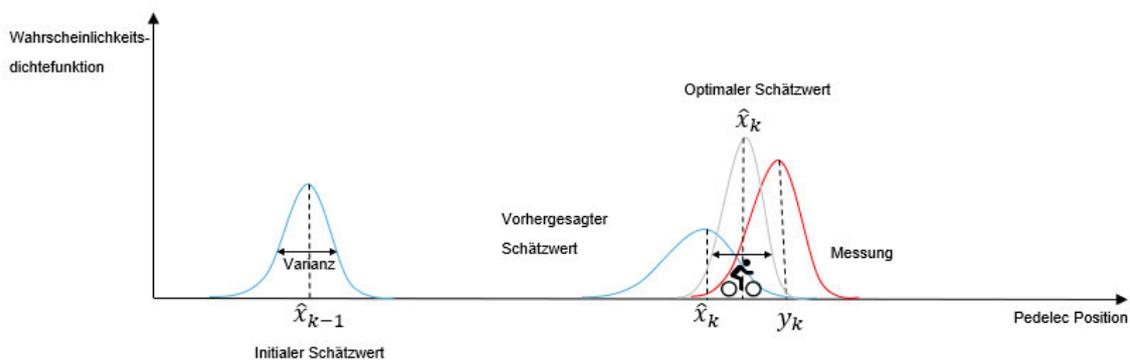


Abbildung 2.16.: Diagramm mit Dichtefunktionen, welche das Verhalten vom Kalman-Filter beschreibt. eigene Darstellung, Prinzip nach [48]

Der Algorithmus sieht einen Vorhersage- und Korrekturschritt vor. Während der Prädiktion wird mit der Variable \hat{x}_k^- eine a-priori-Schätzung des Zustandes berechnet. Parallel dazu wird mit P_k^- die Kovarianzmatrix aufgestellt, die die Rauschverteilung beinhaltet. Im Korrekturschritt wird mit dem Kalman-Gain bestimmt, wie stark die Messung oder die Schätzung gewichtet wird. Konvergiert die Kovarianzmatrix der Messungen R gegen null, fällt die Gewichtung des Kalman-Gains K_k zugunsten des Messwertes. Umgekehrt, wenn die Kovarianzmatrix der a-priori-Schätzung P_k^- gegen null konvergiert, wird der Kalman-Gain K_k zu null und das Update der Schätzung \hat{x}_k tendiert zum Wert der Vorhersage \hat{x}_k^- . Die Kovarianzmatrix wird ebenfalls erneuert. Diese wird über die Differenz aus der vorhergesagten Kovarianz P_k^- und der mit dem Kalman-Gain K_k gewichteten und durch die Beobachtungsmatrix C multiplizierten Vorhersage gebildet [48].

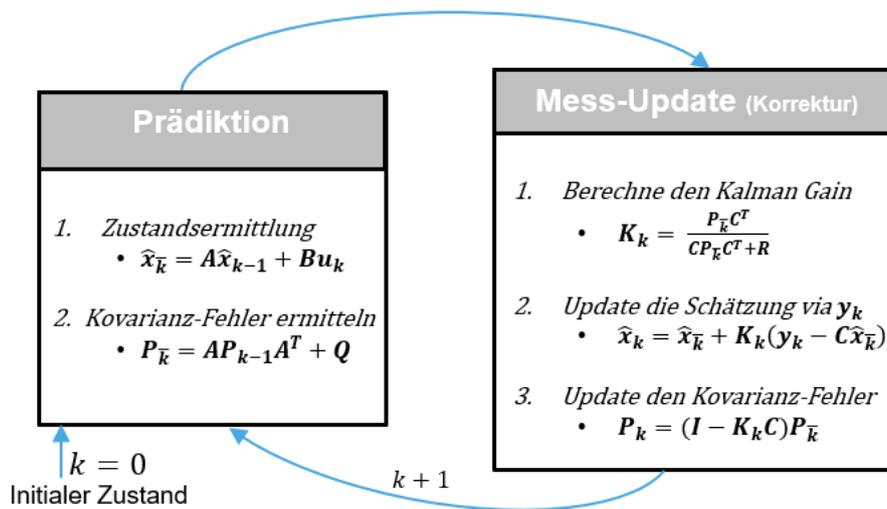


Abbildung 2.17.: Kalman Algorithmus mit Update und Prädiktion [48].

2.6.4. Extended Kalman-Filter

Für nichtlineare Funktionen muss der lineare Kalman-Filter erweitert werden. Diese Erweiterung sieht eine partielle Linearisierung um die Mittelwerte der Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor. Diese Linearisierung kann mit Hilfe der partiellen Ableitungen der Übergangsfunktionen in A zur jeweils geschätzten Verteilung ausgewertet werden. Eine Matrix, die partielle Ableitungen enthält, ist auch als Jacobi-Matrix bekannt [48].

2.7. Messfehler- und Ausgleichsrechnung

Da in dieser Arbeit ein Schwerpunkt auf Messungen mit Sensorik liegt, werden in diesem Abschnitt wichtige Aspekte diesbezüglich erläutert. Beim Versuch, durch Sensormessungen das Geschehen in der analogen Welt digital abzubilden, ist stets mit Fehlern zu rechnen. In diesem Abschnitt sollen diese charakterisiert werden und eine angewandte Methode zur Fehlerausgleichsrechnung gezeigt werden.

2.7.1. Fehlerarten

Im Wesentlichen lassen sich drei Fehlerarten unterscheiden, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

- *Grobe Fehler:*
Diese Fehlerart ist auf ein fehlerhaftes Verhalten des Beobachters zurückzuführen. Sie kann beispielsweise durch falsches Ablesen von Messwerten vorkommen. Auch die Benutzung eines nicht funktionsfähigen Messinstrumentes lässt sich in diese Kategorie einordnen. Diese Fehlerart ist vermeidbar.
- *Systematische Fehler:*
Ungenauere Messmethoden oder fehlerhafte Messinstrumente können Verursacher dieser Fehlerart sein. Die Messwerte haben hier die Eigenschaft, alle eine systematische Abweichung zu besitzen, die bei gründlicher Untersuchung auffallen kann. Durch ein Korrekturglied kann die Fehlerart nachträglich korrigiert werden. Durch gründliche Vorarbeiten ist diese Art jedoch vermeidbar.
- *Zufällige Fehler:*
Die am wenigsten vermeidbare Fehlerart entsteht beim Auftreten von zufälligen Abweichungen. Gründe hierfür können z.B. unkontrollierbare Störeinflüsse sein. Es lässt sich keine Regel bei den Abweichungen erkennen. Solche Fehler werden auch statistische Messabweichungen genannt.

Zur Kompensierung und Untersuchung der statistischen Messabweichungen gibt es mathematische Methoden. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird eine dieser Methoden verwendet, um die zufälligen Positionsabweichungen in messbare Größen zu formulieren [39].

2.7.2. Ausgleichsrechnung

Mit Hilfe einer linearen Ausgleichsgeraden lässt sich ein funktionaler Zusammenhang der Messpunkte bestimmen. Es wird nach einer Funktion gesucht, die sich den Messpunkten

möglichst gut annähert. In technischen Anwendungen treten lineare Funktionen besonders häufig auf. Im Falle einer Positionsbestimmung ist eine lineare Verteilung der Messwerte wahrscheinlich. Die Ausgleichsgerade hat die bekannte Form:

$$y = f(x) = ax + b \quad (2.11)$$

Auf die Abbildung 2.18 bezogen gilt für die Abstände v_i zur Ausgleichsgeraden die Beziehung:

$$v_i = y_i - (ax_i + b) = y_i - ax_i - b \quad (2.12)$$

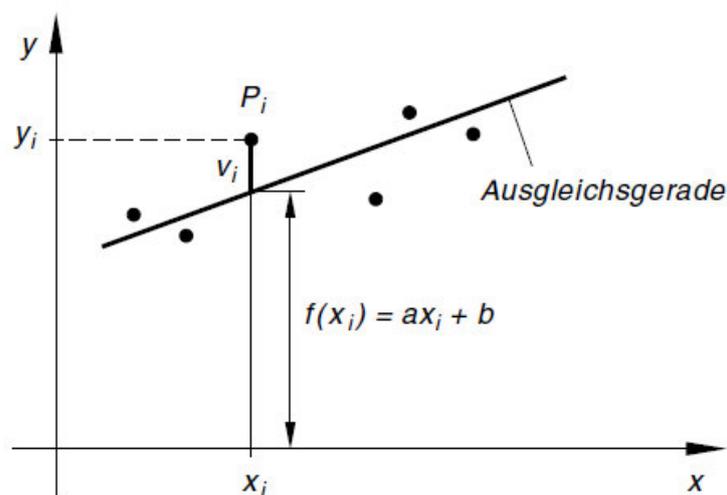


Abbildung 2.18.: Bildung einer Ausgleichsgeraden zwischen linear verteilten Messpunkten [39]

Mit der *Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate* lässt sich die Steigung a und der Y-Achsenabschnitt b wie folgt bestimmen:

$$S(a; b) = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (2.13)$$

Die Abstände v_i sollen dabei minimiert werden. Diese werden dann minimal, wenn die partiellen Ableitungen der Gleichung 2.13 den Wert null annehmen. Weitere Informationen lassen sich nachlesen unter [39]. Im Rahmen dieser Arbeit können aus den Koordinaten von Fahrspuren Ausgleichsgeraden gebildet und die Positionsabweichung bestimmt werden.

3. Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden neben dem Gesamtsystem die einzelnen Komponenten des prototypischen Aufbaus um das elektrische Lastenfahrrad beschrieben. Zudem wird die von NXP bereitgestellte Hardware gezeigt und erläutert. Anhand des Aufbaus soll die im Titel der Arbeit angedeutete Positionsbestimmungsmethode untersucht werden.

3.1. Gesamtsystem

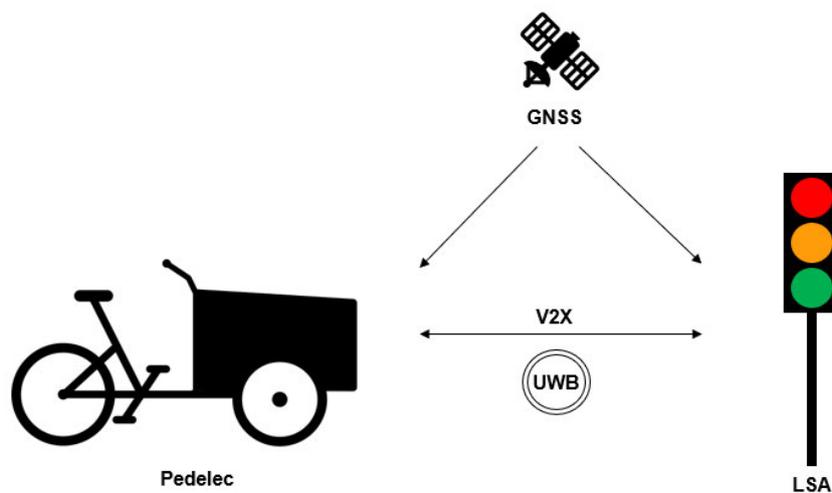


Abbildung 3.1.: Das Gesamtsystem bestehend aus Pedelec und Lichtsignalanlage; GNSS dient als globales Positionsbestimmungssystem und wird vergleichsweise herangezogen. eigene Abb.

Die Abbildung 3.1 zeigt einen groben Überblick vom Gesamtsystem. Der prototypische Aufbau besteht im Wesentlichen aus dem elektrischen Lastenfahrrad und einer Licht-Signal-Anlage. Für Testzwecke wurde letztere auf einer beispielhaften Kreuzung auf dem Firmengelände von NXP Hamburg aufgebaut. Die zwei Hauptkomponenten beherbergen verschiedene Unterkomponenten, welche zur Vernetzung und begrenzten Autonomisierung fungieren.

Die Positionsbestimmung über GNSS im Straßenverkehr wird in dieser Arbeit zum Vergleich herangezogen und soll zudem einer Initialen Positionsbestimmung dienen. Die Grafik nimmt zudem vorweg, dass ein Ranging mit Ultrawideband und V2X-Kommunikation mit einer Ampel stattfinden soll.

3.2. Pedelec - das elektrische Lastenfahrrad

Das dreirädrige, elektromotorisierte Lastenfahrrad dient im Rahmen dieser Masterarbeit als Demonstrator, an dem eine genauere Positionsbestimmung im Straßenverkehr erprobt werden soll. Lenkwinkel und Motor lassen sich bereits fernsteuern und wurden vorbereitend durch den Autor entwickelt. Eine autonome Steuerung des Fahrrades ist somit möglich. Im Rahmen dieser Masterarbeit soll diese Funktionalität mit Hilfe einer erweiterten akkuraten Positionsbestimmung genutzt werden, um das Pedelec einen Parcours selbstständig durchfahren lassen zu können.

Neben dem obligatorischen Zubehör eines elektrischen Fahrrades, wie Bremsanlage, Gangschaltung und Elektromotor, wurde das Pedelec mit zusätzlicher, elektronischer Hardware versehen. Eine LED-Anzeige dient als Mensch-zu-Maschinen-Schnittstelle und zeigt dem Fahrer beispielsweise an, wie lange die aktuelle Ampelphase dauert. Wenn sich ein fremdes Fahrzeug nähert und eine mögliche Kollision droht, wird ein optischer Reiz über die LED-Leuchten erzeugt. Notwendige Verkehrsdaten zur Vermeidung einer Kollision oder zum Erhalt von Statusinformationen der aktuellen Ampelphase werden von einer MK5-Box der Firma Cohda Wireless bereitgestellt.

Über die Verkehrsvernetzung V2X können Nachrichten empfangen und gesendet werden. Dank integriertem GNSS können Rückschlüsse über den momentanen Ort, Richtung und Geschwindigkeit des Pedelecs gezogen und das Verhalten des Fahrers beeinflusst werden. Es kann aber auch ein automatischer Eingriff stattfinden und beispielsweise eine Regulierung von Fahrtrichtung und Geschwindigkeit des Fahrrades erfolgen. Diese Aufgaben übernimmt ein Board-Computer, der Sensoren und Aktuatoren steuert. Der Lenkwinkel ist über einen zusätzlich verbauten, bürstenlosen Servomotor einstellbar. Die Stellung des Lenkwinkels kann über einen Winkelsensor abgefragt werden.

Die Abbildung 3.2 zeigt das Pedelec der Firma XYZ-Cargo im aktuellen erweiterten Zustand.



Abbildung 3.2.: Der prototypische Demonstrator: Das autonome und vernetzte Lastenfahrrad

3.2.1. Allgemeine Bestandteile des Fahrrades

Das elektrische Lastenfahrrad wurde initial für projektübergreifende Demonstrationen im Bereich der Vehicle-to-Vehicle (V2X) Kommunikation angeschafft. Vor der Umrüstung und Ausstattung mit erweiterter Hardware, hatte das Pedelec den anhand der Tabelle 3.1 beschriebenen Grundzustand [15].

3.2.2. Erweiterungen

Zur Erfüllung weiterer Funktionalität wurde das Pedelec mit den folgend beschriebenen Komponenten ausgestattet. Eine Übersicht der Komponenten bietet die Abbildung 3.3. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Erweiterungen wurden im Vorfeld der Masterarbeit am Pedelec installiert.

Boardcomputer

Als zentrale Rechen- und Steuereinheit dient der Einplatinencomputer Raspberry Pi 3 B+. Durch die zahlreichen GPIO-Ports und gute Dokumentation eignet sich der Computer besonders gut für einen prototypischen Aufbau.

Tabelle 3.1.: Auflistung der Grundbestandteile vom Pedelec [15].

Maße	34 kg, 208 x 94 x 105cm (LxWxH)
Ladefläche	Box: 80 x 55 x 40cm (LxWxH); bruchsicheres, transparentes Polycarbonat
Ladekapazität	220kg
Rahmen	eloxiertes Aluminium-Rohr mit Edelstahl Verschraubungen und selbstsichernde Muttern
Gangschaltung	8-Gang Shimano Nexus
Bremssystem	vorn: spezielle Lastenrad-Trommelbremse 90mm von Sturmey Archer (inkl. Synchron-Brems-System), hinten: Scheibenbremse
Laufräder	2x 20"(vorn), 26"(hinten)
Reifen	Schwalbe Marathon
Sattel	höhenverstellbar, mit Schnellspanner
E-Bike Upgrade / Pedelec Motor inkl. Li-Ionen Akku und Scheibenbremsen	Technische Daten: drehmomentstarker 250W/36V Hinterrad-Nabenmotor mit 55Nm, 375-480Wh Li-Ion Batterie, Reichweite: 40-60km, Drehgriff zur Geschwindigkeitskontrolle

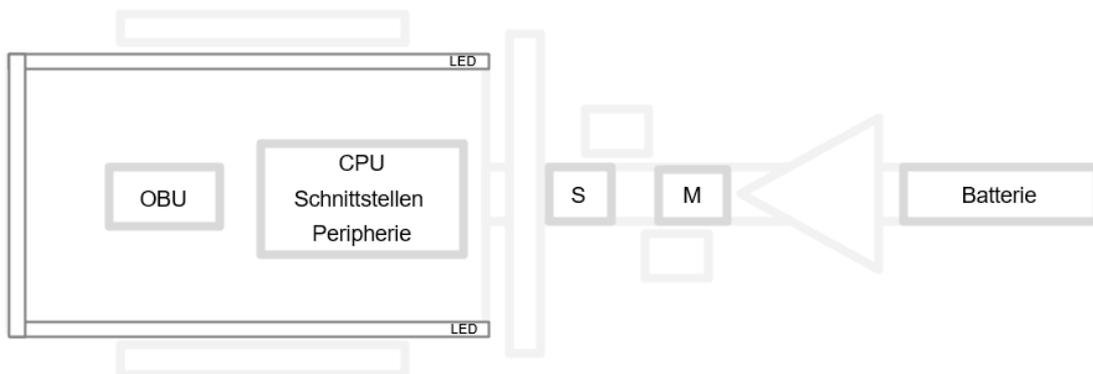


Abbildung 3.3.: Überblick der Hardwarebestandteile und -erweiterungen am Pedelec; OBU: On-Board-Unit, S: Servomotor, M: Motor; eigene Darstellung

Mensch-Maschinen-Schnittstelle

Um dem Benutzer des Lastenfahrrades Fahrmodi und Informationen anzeigen zu können, wurde eine LED-Streifenvorrichtung installiert. Die verschiedenen Zustände sind in Tabelle 3.2 verdeutlicht. Es existieren 69 RGB-LEDs auf dem Streifen, der auf dem Rand der Ladebox am Pedelec, wie in der Abbildung 3.3 zu sehen ist, befestigt wurde. Es soll beispielsweise ein Warnleuchten generiert werden, wenn dem Fahrer des Lastenfahrrades als schwächerer Verkehrsteilnehmer (VRU)¹ eine Kurskreuzung mit einem stärkeren Verkehrsteilnehmer bevorsteht. Das Anzeigen der aktuellen Ampelphase und Abzählen eines Countdowns bis zum Wechsel zur nächsten Phase kann ebenfalls angezeigt werden. Die Informationen hierfür werden über die nach den ITS-Richtlinien definierten Verkehrsnachrichten bereitgestellt und gehen von der jeweiligen betreffenden Kreuzung aus, auf die man zusteuert.

Tabelle 3.2.: LED-Streifen Anzeigemöglichkeiten und Bedeutung

Bereich	Anzeige	Bedeutung
1	Rotes/Grünes oder Oranges Schalten der mittleren LEDs vorne	Anzeigen der aktuellen Ampelphase mit Countdown. Die letzten 10 Sekunden vor Änderung der Ampelphase werden dem Benutzer angezeigt.
2	Rotes Aufblinken der seitlichen Mittelstreifen	Gefahrenanzeige zum Schutz des schwächeren Verkehrsteilnehmers (VRU - Vulnerable Road User)
3	Oranges Blinken untere 3 Leuchten rechts und links	Blinker rechts/links

Raspberry Pi - Schnittstelle

Es existiert eine Schnittstelle für den Raspberry Pi, die an den GPIO Ports angeschlossen ist. Diese dient im Wesentlichen zur Konvertierung von Spannungsleveln, sowie dem Einlesen der Sensoren und Steuern der Aktuatoren.

- **ADC** - Einlesen der Spannungen vom Winkelsensor, Motor und Pedale.

¹ VRU: Vulnerable Road Users (dt. schwache Verkehrsteilnehmer) sind nach den ITS-Richtlinien unter anderem nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger und Radfahrer, aber auch motorisierte Fahrräder oder Menschen mit Handikap, die im Rollstuhl unterwegs sind.[6]

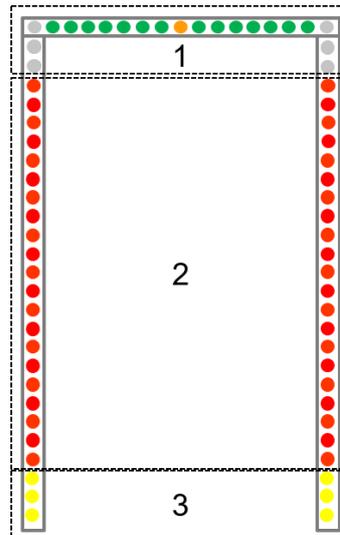


Abbildung 3.4.: HMI des Pedelecs zum Anzeigen von Ampelphase (Bereich 1), Blinken (Bereich 3) und Warnung bei Gefahr (Bereich 2)

- **DAC** - Steuern der Motor- und Pedalsignale
- **Relais** - Überbrücken von Motorgas und Pedalspannung zur Steuerung per Software.

Auf der Platine befinden sich zudem die Steckplätze der weiteren Hardwarekomponenten die über den Raspberry Pi angesprochen werden.

Gas- und Pedal- Sensorik

Der Controller am Pedelec-Motor wurde um Verbindungen erweitert, sodass die Signale abgegriffen und gesteuert werden können.

Servomotor

Zur Fernsteuerung des Fahrrades wurde unterhalb der Lenkachse ein bürstenloser Servomotor installiert. Dieser lässt sich über digitale Eingänge ansprechen.

Winkelsensor

Der Winkelsensor dient dem Abfragen der aktuellen Stellung des Servomotors. Dafür wurde ein diametraler Magnet auf dem Zahnrad des Servomotors angebracht und der Sensor mit einer 3D-Konstruktion über dem Magneten platziert.

Odometer

Geschwindigkeit und Distanz liefert die Messung mit dem Odometer am Hinterreifen. Im Sekundentakt werden neue Werte ermittelt.

3.2.3. MK5 V2X On-Board-Unit

Für die Verkehrskommunikation ist die in dieser Arbeit verwendete MK5 Box von Cohda Wireless zuständig. Mit ihr lassen sich die notwendigen Verkehrsinformationen, geographische Lage über GNSS oder Beschaffenheit einer Kreuzung beziehen. Entsprechend ihrer Konfiguration werden unterschiedliche Daten ausgesendet. Als Roadside Unit konfiguriert, können mit ihr die besagten Informationen über eine Kreuzung bereitgestellt werden. Dazu gehören zum Beispiel die Anzahl und Koordinaten der Fahrspuren. Ausgehend von einem festgelegten Referenzpunkt sind diese für jede Kreuzung definiert. Die Abbildungen [3.5](#) und [3.6](#) zeigen die MK5 als OBU und RSU. Die wetterfeste Bauweise der RSU lässt auf ihren Einsatzort in rauer Umgebung schließen. Software-seitig ist eine Konfigurierung der OBU jedoch auch als RSU möglich.

3.2.4. Hardwareerweiterungen am Pedelec im Rahmen der Masterarbeit

Die im Rahmen dieser Arbeit implementierten Erweiterungen werden in diesem Abschnitt beschrieben. Zu diesen Erweiterungen gehören im Wesentlichen sensorische Bauteile, die für eine präzise Positionsbestimmung notwendig sind und sich gut in das Gesamtsystem integrieren lassen.



Abbildung 3.5.: Cohda Wireless MK5 Box als On-Board-Unit [7]



Abbildung 3.6.: Cohda Wireless MK5 als Road-Site-Unit [9]

IMU

Der Gebrauch einer inertialen Messeinheit wurde bereits im Grundlagenteil ausführlich beschrieben. Die für diese Arbeit verwendete Einheit zeigt die Abbildung 3.7. Mit einer IMU kann die aktuelle Orientierung des Pedelecs bestimmt werden. Es kommt ein 9-DOF Breakout Board von Adafruit zum Einsatz, das die 3 Sensorarten - Beschleunigungssensor, Magnetometer und Gyroskop - in räumlicher Anordnung vereint. Die Sensoren wurden als ICs (Integrated Circuit²) von NXP hergestellt. Der Beschleunigungssensor und ein Magne-

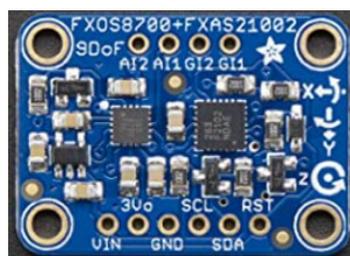


Abbildung 3.7.: Inertiale Messeinheit mit der Dimension (LxBxD): 28,3 mm x 20,5 mm x 3 mm [2]

² *Integrated Circuit*: engl. für integrierter Schaltkreis; elektronische Schaltung, die in sehr kleinem Größenausmaß auf einem Halbleitermaterial in aufwändigen Prozessen hergestellt wird;

tometer sind im Chip *FXOS8700* integriert und haben die in der Tabelle 3.3 enthaltenen Spezifikationen nach Datenblatt [5].

Tabelle 3.3.: Spezifikationen von Beschleunigungssensoren und Magnetometern der IMU

Bauteil	Beschreibung	Spezifikation
Magnetometer/ Akzelerometer	Versorgungsspannung	2-3,6 V
Magnetometer/ Akzelerometer	Ausgangsdatenrate	1,563 Hz - 800 Hz
Magnetometer	Sensor Range	$\pm 1200 \mu T$
Akzelerometer	Sensor Range	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g$
Akzelerometer	ADC Auflösung	14-Bit
Magnetometer	ADC Auflösung	16-Bit

Der Chip *FXAS21002* enthält das 3-achsige Gyroskop mit den folgenden Spezifikationen in Tabelle 3.4 nach Datenblatt [4]. Die IMU hat zudem einen integrierten Temperatursensor. Mit dessen Hilfe können temperaturbedingte Messabweichungen berücksichtigt werden.

Tabelle 3.4.: Spezifikationen des Gyroskops der IMU

Bauteil	Beschreibung	Spezifikation
Gyroskop	Versorgungsspannung	1,95-3,6 V
Gyroskop	Ausgangsdatenrate	12,5 Hz - 800 Hz
Gyroskop	Sensor Range	$\pm 250 / 500 / 1000 / 2000^\circ / s$
Gyroskop	ADC Auflösung	16-Bit

UWB-Board zur Distanzmessung

Das im Rahmen dieser Arbeit zur Distanzmessung verwendete UWB-Board ist in der Abbildung 3.8 zu sehen. Es handelt sich um ein Ranger 4 (NCJ29D5) Chip von NXP Semiconductors. Ursprünglich wurde dieser dafür entwickelt, um Sicherheitslücken bei passiven, schlüssellosen Zugangssystemen (passive keyless entry - PKE) zu kompensieren. Über gesicherte Distanzermittlungen soll es Dieben unmöglich gemacht werden, ein Auto zu steuern. In dieser Arbeit wird der Chip mit dem S32K144 Evaluationsboard dafür benutzt, um

eine möglichst genaue Lokalisierung zu ermöglichen. Auf dem Ranger 4 Board und dem S32K144 Mikrocontroller wurde im Vorweg Firmware implementiert um Ranging-Sequenzen durchführen zu können. Die ausgeführte Distanzermittlung wird durch das Evaluationsboard über Mikro-USB als Schnittstelle übertragen. Die Distanzen können aus einem hexadezimalen Ausgabestring seriell ausgelesen werden. Die Konfiguration des Boards geschieht ebenfalls über Senden eines hexadezimalen Strings, der Informationen wie Datenübertragungsfrequenz über einen der im IEEE Standard vorbestimmten Übertragungskanäle (Kanäle 0-15)[17]. Die angegebene Frequenz ist dabei die Mittelfrequenz des ca. 500 Hz breiten Signals. Die wichtigsten Einstellungen, die im Rahmen dieser Arbeit getätigt wurden, sind in der Tabelle 3.5 zu sehen.

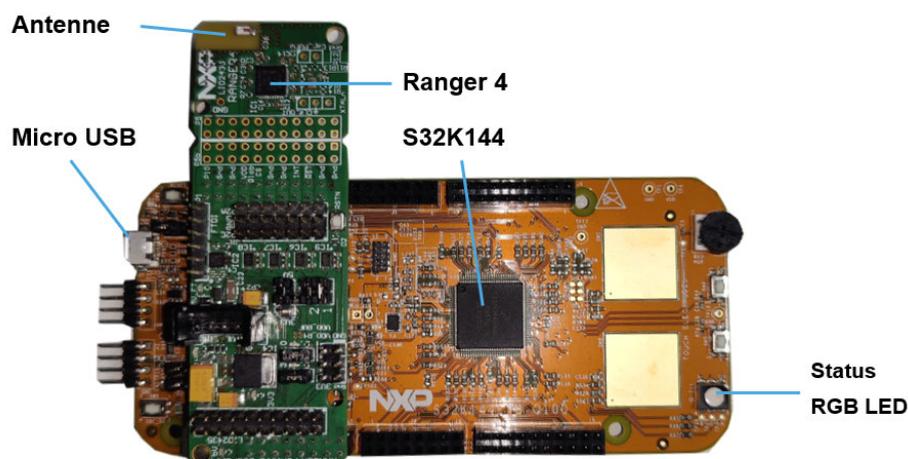


Abbildung 3.8.: UWB Ranger4 Board und S32K144EVb, bereitgestellt von NXP; eigene Abb.

Die nominale Sendeleistung steht für die einstellbare Leistung des ausgestrahlten UWB-Signals. Diese darf in einem EU-regulierten Gebiet die erlaubten Angaben nicht überschreiten [22]. Das Ranging-Intervall gibt an, wie oft eine Distanzbestimmung stattfinden soll. In diesem Fall alle 100 Millisekunden. Auch die Distanzschwelle (Threshold) ist interessant, da diese die maximale Ranging-Reichweite angibt.

Tabelle 3.5.: Konfigurationen für das UWB-Ranging

Begriff	Einstellung
Mittelfrequenz	7987200 kHz (CH9)
Nominale Sendeleistung	14 dBm
Ranging Intervall	100 ms
Distanz Threshold	100 m

3.3. Lichtsignalanlage

Ein provisorischer Aufbau bestehend aus RSU und UWB-Board dient im Rahmen dieser Arbeit als Lichtsignalanlage. Das Anzeigen einer Ampelphase steht hier nicht im Vordergrund. Es wird eine On-Board-Unit verwendet und als RSU konfiguriert. Die LSA bekommt einen fest zugewiesenen Punkt im Koordinatensystem der Kreuzung.

3.4. Demo-Kreuzung

Um den prototypischen Aufbau testen zu können, wurde eine Demokreuzung auf dem NXP Gelände in Hamburg errichtet. Der Ort des Testaufbaus wurde bewusst so gewählt, dass erhöhte Satellitensichtabdeckung gegeben ist. Die Testkreuzung ist umgeben von einem U-förmigen Gebäude. Die Abbildung 3.9 zeigt den Aufbau der Demokreuzung. Gegeben ist die mittige Position der LSA. Diese dient als UWB-Ankerpunkt und ist beim Ranging mit dem Pedelec verknüpft. Von letzterem geht die initiale Ranging-Sequenz aus. Die Daten werden beim Initiator ausgewertet. In blau ist der zu fahrende Parcours markiert.

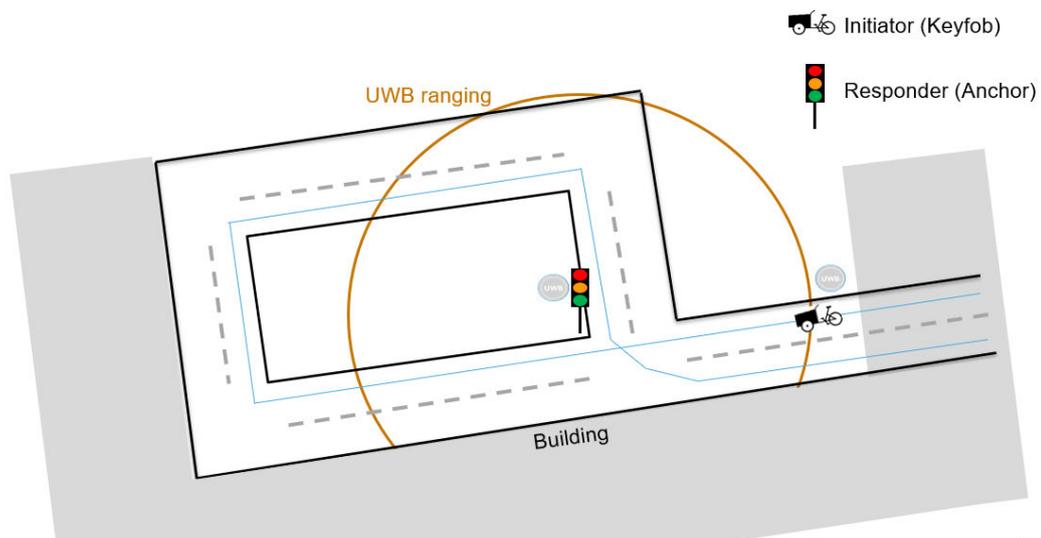


Abbildung 3.9.: Demokreuzung, eigene Darstellung

4. Analyse

An dieser Stelle wird auf die in dieser Arbeit gestellte Aufgabe noch einmal genauer eingegangen. Auch wird eine Analyse durchgeführt, bei der die Rahmenbedingungen des Gesamtsystems aus Kapitel 3.1 untersucht und zu einer Anforderungsanalyse zusammengefasst werden. Dabei liegt ein Fokus darauf, wie ausgeprägt die Genauigkeit der Positionsbestimmungsmethode im Straßenverkehr sein muss, um den Anforderungen zu genügen. Des Weiteren soll festgestellt werden, ob diese auch reichen, um den vorgestellten Demonstrator autonom einen Parcours abfahren zu lassen. Dafür werden existierende Lösungsansätze zum Vergleich herangezogen. Aus diesem Kapitel sollen Randbedingungen und Anforderungen für ein mögliches Konzept hervorgehen.

Es werden zudem die folgenden Fragestellungen behandelt:

- Reichen Positionsbestimmungsmethoden mit GNSS im urbanen Umfeld aus?
- Wie präzise muss eine Genauigkeit auf Fahrspurebene sein und ist dies immer gegeben?
- Wie hoch sind die Anforderungen an die Sensorik?

4.1. Szenario: Positionsbestimmung im abgedeckten urbanen Raum

Die direkte Sichtabdeckung von Funksignalen zur Positionsbestimmung hat wie im Kapitel 2.2.1 beschrieben, Auswirkungen auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Es entstehen unterschiedliche Distanzbestimmungen mit Satellitensignalen durch Mehrwegausbreitung aufgrund von Sichtabdeckung und Reflexionen an hohen Gebäuden, woraufhin ein Signal einen längeren Weg zurücklegen muss. Hierfür reichen Verbesserungen an der Software meist nicht aus, um das Problem im ausreichenden Umfang zu lösen. Ein realitätsnahes Anwendungsszenario, um die Branche des autonomen und vernetzten Fahrens voranzutreiben und Tests zu ermöglichen, bietet die Teststrecke für autonomes und vernetztes Fahren in Hamburg (TAVF)[11]. Hier können Messfahrten unternommen werden, um die technischen Mittel optimal auf den Einsatz im urbanen Umfeld abzustimmen. Durchgeführte Testfahrten

haben gezeigt, wie die Messungsgenauigkeit an bestimmten Stellen zunimmt. Die Abweichungen vom eigentlichen Pfad sind so groß, dass nicht mehr erkannt wird, auf welcher Fahrbahn gefahren wurde. Das Maß der Ungenauigkeit scheint dort erhöht zu sein, wo eine Abdeckung der Satelliten durch hohe Gebäude wahrscheinlicher ist. Die Abbildung 4.1 zeigt Ergebnisse der Testfahrt. Die erhöhten Anforderungen an eine Positionsbestimmungsmethode werden ersichtlich. Besonders ausgeprägt müssen sie sein, wenn die Ortung eines Fahrrades auf einer schmalen Fahrradspur ermöglicht werden soll. Die Messungen wurden mit einer

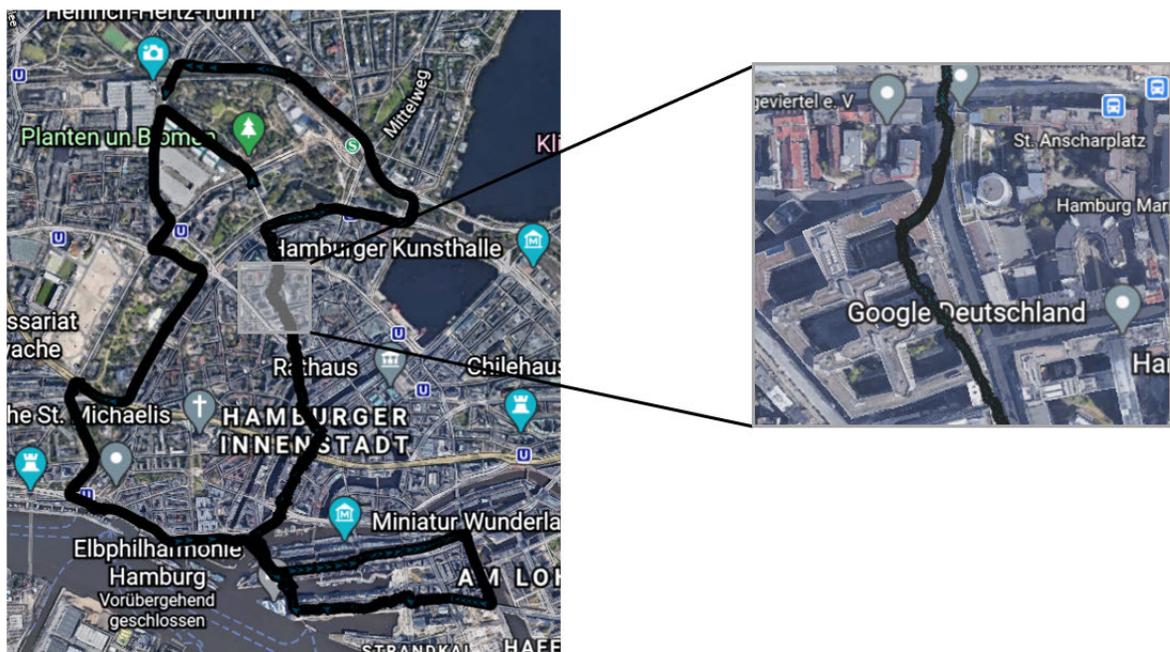


Abbildung 4.1.: Messungen auf der Teststrecke für autonomes und vernetztes Fahren in Hamburg [1].

MK5 OBU von Cohda Wireless [8] durchgeführt. Diese soll nach Angabe des Herstellers eine GNSS Genauigkeit auf Fahrbahnebene liefern. Es wird deutlich, dass dies aufgrund der Umgebungsbedingungen nicht immer möglich ist. Die Messergebnisse haben auch gezeigt, dass die Ungenauigkeit auch dann steigt, wenn sich ein Fahrzeug in Ruhe - beispielsweise an einer roten Ampel stehend - befindet. Diese Ungenauigkeit der GNSS Werte scheint darin begründet, dass keine Interpolation der Messwerte mehr stattfindet. Dies ist während der Fahrt hingegen gegeben. Der Umstand der verringerten Genauigkeit im Ruhezustand hat eine Ausbesserung der Lokalisierungsmethode im Speziellen an Kreuzungen zur Folge. Die Ergebnisse der Messfahrt führen zur Notwendigkeit einer Erweiterung der gegebenen Mittel zur Lokalisierung im Straßenverkehr. Im Rahmen dieser Masterarbeit soll mit Hilfe des in den Rahmenbedingungen beschriebenen Demonstrators ein solches Szenario angemessen nachgestellt werden, um mit geeigneten Gegenmaßnahmen auf die Ungenauigkeit der

Positionsbestimmung zu reagieren. Für diesen Zweck galt es zudem einen vergleichbaren, von hohen Gebäuden abgedeckten Platz im Freien zu finden.

4.2. Anforderungen und Randbedingungen

Nachdem das generelle Problem nun bekannt ist, können Anforderungen diskutiert werden und eine Bestimmung von Randbedingungen erfolgen. Um die Position an Orten mit niedriger Satellitenabdeckung besser bestimmen zu können müssen weitere Sensoren herangezogen werden. GNSS liefert bereits die wesentlichen Daten wie Geschwindigkeit, Richtung und globale Position. Es muss vor allem jedoch die Verfügbarkeit und Auflösung der Positionsdaten lokal verbessert werden. Zudem sollte die Möglichkeit der Umsetzung im Straßenverkehr geprüft werden.

Für Positionsbestimmungen im Innenraum wird häufig durch mehrere Stützpunkte oder Anker, die eine bekannte Position im Raum haben, Multilateration durch Distanzbestimmungen mit dem TDOA-Verfahren möglich gemacht. Auf diese Weise lassen sich Objekte, die sich durch den Raum bewegen sehr genau lokalisieren. Für den Außenbereich ist dieses Verfahren nur bedingt anwendbar, da die erhöhte Anzahl von Ankern einen hohen Hardwareaufwand mit sich zieht. Auch lässt die Straßenumgebung nicht immer eine adäquate Installation der Hardware zu. Zudem sind im Außenraum größere Distanzen zu überbrücken. Dadurch erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit, dass eine oder mehrere Stützpositionen eine abgedeckte Sicht haben, da durch erhöhtes räumliches Volumen auch mehr Objekte Platz finden. Ein solches Verfahren wird im Whitepaper [14] vorgestellt. Dort wird über den ITS-G5 WLAN Standard mit mindestens vier RSUs und einer OBU gearbeitet. Dies bedarf also einer vollausgerüsteten Infrastruktur mit V2X-Technologie. Für den Straßenverkehr gilt es, mit so wenig Hardwareaufwand und so wenigen Umbaumaßnahmen wie möglich auszukommen. Die Randbedingungen und Anforderungen werden also vor allem durch die Infrastruktur im Straßenverkehr aufgestellt. Weitere Randbedingungen gehen aus den Grundlagen der Positionsbestimmung und Navigation hervor.

Es wird weitere Sensorik benötigt, mit der Aussagen über Geschwindigkeit und Fahrtrichtung eines Objektes getroffen werden können. Dies ist auch notwendig, um vorübergehende Schwachpunkte der GNSS Positionsermittlung auszugleichen, falls der Empfang gestört ist. Zudem sollte ein Bezugspunkt über die Infrastruktur hergestellt werden, der eine lokale Positionsreferenz liefert. Mit dieser wird die Schwachstelle einer Positionsbestimmung über eine globale Methode wie GNSS ausgeglichen und zugleich ein Abdriften verhindert, wie es vom Dead Reckoning bekannt ist. Die Randbedingungen, die durch eine IMU und ein Odometer hinreichend erfüllt werden können, sind die folgenden.

- **Geschwindigkeit**

Bestimmbar über Odometrie und Auswertung der Beschleunigungssensordaten der IMU.

- **Fahrtrichtung**

Diese Randbedingung ist erfüllbar durch Auswertung der Gyroskop-Daten. Die Veränderung der Fahrtrichtung sind über die Winkelgeschwindigkeit messbar.

Dies sind Daten, die vom Körper oder Objekt erhoben werden. Zusätzlich zur körperbezogenen Positionsbestimmung und Navigation kann eine Lokalisierung mit Hilfe eines Referenzpunktes geschehen. Ein Bezug zu einem lokalen Referenzsystem kann durch ein oder mehrere fixierte Ankerpunkte im Straßenverkehr erreicht werden.

Dafür bietet es sich an, die bestehenden Stationen (RSUs) der Ampeln zu nutzen. In den Konfigurationsdateien der ETSI-Applikationen - im Speziellen in einer MAP - sind geografische Koordinaten der Kreuzung abgelegt. Von dieser Information kann im lokalen System an jeder mit V2X ausgerüsteten Kreuzung Gebrauch gemacht werden. Bezogen auf diesen Kreuzungsreferenzpunkt kann die Position eines Verkehrsteilnehmers bestimmt werden. Dies kann über Distanzbestimmung in Kombination mit dem AoA (Angle of Arrival) geschehen. Eine solche Funktionalität bietet die UWB-Technologie.

- **Lokaler Bezugspunkt im Referenzsystem (Kreuzung)**

Die Position eines Verkehrsteilnehmers in einem lokalen System wie eine Kreuzung im Straßenverkehr kann über Distanzmessung und Ankunftsinkelbestimmung errechnet werden. Als Referenzstation kann eine ITS-Station (RSU) dienen. Die lokale Referenz dient der Kompensierung vom Drift körperbezogener Sensorsysteme wie bei der Gier rate über die IMU.

Die über ein solches, lokales System ermittelte Position gilt nur für das Koordinatensystem der Kreuzung. Über den Referenzpunkt der Kreuzung, der zugleich Koordinatenursprung des lokalen Systems ist, können alle kartesischen 2D-Koordinaten in globale Koordinaten umgeformt werden. Auf diese Weise ist die Position von einem lokalen System zum nächsten übertragbar.

4.2.1. Analyse der Anforderungen

Ein Fahrzeug muss einer Fahrspur zugeordnet werden können, damit diesem beispielsweise eine Signalgruppe zugeteilt werden kann. Es muss also eine Positionsbestimmung auf Fahrspurebene möglich sein. So können auf die Fahrspur bezogene Daten wie Ampelphase und Geschwindigkeitsvorschläge dem Fahrer bzw. Fahrzeug mitgeteilt werden. Die Ergebnisse der Abbildung 4.1 zeigen, dass dies aktuell auch mit der Verkehrsvernetzung und hochmodernem GNSS nicht erreicht wird. Dieser Umstand stellt erweiterte Anforderungen an die

Technologien zur Positionsbestimmung. Je schmaler die Fahrspur und je breiter das Fahrzeug, desto höher sind die Genauigkeitsanforderungen.

Spezifizierung der Genauigkeit

In der Straßenverkehrszulassungsordnung (kurz: StVZO) sind die maximal zulässigen Grundmaße für Fahrzeuge in Deutschland unter § 32 festgelegt [12]. Dadurch ergeben sich unter anderem Angaben für eine maximale Fahrbahnbreite. Aus diesen lassen sich Daten für eine Genauigkeitsanalyse ableiten. Grundlegend lässt sich folgendes für eine Fahrspurerkennung spezifizieren:

- Breite einer Fahrspur in Deutschland: 3,05 m bei einer maximalen Fahrzeugbreite von 2,55 m
- Mittig auf dem Fahrzeug platzierter Ankerpunkt
- Ein eindeutiger Fahrspurwechsel besteht, wenn der Ankerpunkt die Grenzen der Fahrspur überschritten hat
- Daraus ergibt sich ein Toleranzbereich von $\pm 1,525$ m für eine tolerierbare Abweichung quer zur Fahrbahn, wenn sich das Fahrzeug mittig der Spur befindet.

Eine Fahrradspur ist schmaler und hat somit höhere Genauigkeitsanforderungen zur Folge. Aus Gründen der Vereinfachung wird im Rahmen dieser Arbeit in einer Fahrbahnbreite von 3,05 m gerechnet, um ein Analyseprofil zu erstellen.

Für die Berechnung der Position mit Hilfe eines Winkels (AoA) und einer Distanz zwischen Fahrzeug und einem Ankerpunkt ergibt sich das in der Abbildung 4.2 gezeigte Prinzip.

Die Position des Fahrzeugs $P(x|y)$ lässt sich über die Gleichungen 4.1 und 4.2 mit den Abweichungen der Distanz Δc und des Winkels $\Delta\theta$. Für die Berechnung wird hier $\theta' = 90^\circ - \theta$ verwendet.

$$x = (c + \Delta c) \cdot \sin(\theta' + \Delta\theta) \quad (4.1)$$

$$y = (c + \Delta c) \cdot \cos(\theta' + \Delta\theta) \quad (4.2)$$

Bei einer Distanz zur Ampel von beispielsweise $c = 100m$ und einem AOA von $\theta = 75^\circ$ ergibt sich für den Fall, dass sich an der Position der RSU auch gleichzeitig der Referenzpunkt der Kreuzung befindet, eine Position von $P(25,88 \text{ m} \mid 96,59 \text{ m})$. Mit einer Toleranz von $\Delta\theta = \pm 1^\circ$ ergäbe sich die in der Tabelle 4.3 gezeigte Abweichung von $-1,69m$ in x-Richtung.

Aus der Tabelle wird deutlich, dass eine hohe Abweichung des Ankwunftswinkels von 3° eine Positionsabweichung in X-Richtung von $-5,09m$ zur Folge hätte. Dies würde bedeuten,

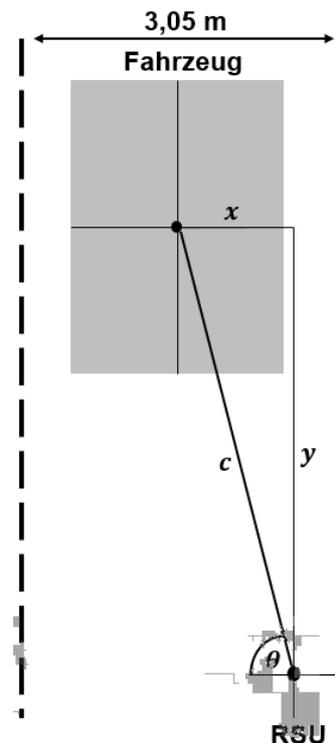


Abbildung 4.2.: Prinzip der Positionsbestimmung mit einem Winkel und Distanz zum Objekt. Zudem sind Maße der Fahrspuren und des Fahrzeugs gezeigt. eigene Darstellung

dass nicht mehr die korrekte Fahrspur erkannt werden würde. Durch Messungenauigkeiten bedingte Abweichungen der Distanz hätten hier weniger Auswirkungen auf die Positionsbestimmung des Fahrzeugs. Die Messungen sind stark abhängig von der Position der RSU. Diese befindet sich in der Regel in erhöhter Position über der Fahrspur oder seitlich der Fahrbahn. Die Höhendifferenz von Fahrzeugreferenzpunkt zu RSU-Referenzpunkt wird hier zunächst nicht beachtet. Durch die senkrechte Lage zum Fahrzeug (vgl. Abbildung 4.2) und die Tatsache, dass die Fahrspurbreite im Verhältnis zur Breite eines herkömmlichen Fahrzeugs nicht wesentlich viel größer ist, werden hohe Genauigkeitsanforderungen an den AoA gestellt.

Eine Winkelabweichung von $\pm 1^\circ$ ist bei 100 m Distanz ebenfalls nicht mehr im tolerierbaren Bereich, da in diesem Fall bei mittig auf der Fahrbahn befindlichem Fahrzeug keine korrekte Fahrspurerkennung mehr möglich ist. Möchte man genauer werden, so bietet es sich an, weitere Ankerpunkte in Betracht zu ziehen, um die Abstände zwischen Fahrzeug und Ankerpunkte zu minimieren. Für eine Spezifikation von $\pm 1^\circ$ Winkelabweichung und einer UWB-Distanzabweichung von $\pm 0,1$ m ist in der Tabelle der Abbildung 4.4 die maximale Distanz aufgezeigt, die ein Ankerpunkt zum Fahrzeug entfernt liegen darf, um eine Position

$\Delta\theta$ [°]	Δc [m]	theta [°]	c [m]	x [m]	y [m]	Δx [m]	Δy [m]
0	0	75	100	25,88	96,59	0,00	0,00
1	0	76	100	24,19	97,03	-1,69	0,44
3	0	78	100	20,79	97,81	-5,09	1,22
0	0,1	75	100,1	25,91	96,69	0,03	0,10
0	1	75	101	26,14	97,56	0,26	0,97
1	1	76	101	24,43	98,00	-1,45	1,41

Abbildung 4.3.: Verdeutlichung der Positionsabweichung bei fehlerbehafteten Messungen. eigene Abb.

nach den geforderten Anforderungen zu bestimmen. Möchte man genauer werden, sollten die Messungen also bei geringeren Distanzen durchgeführt werden - wie hier bei weniger als 89 m.

$\Delta\theta$ [°]	Δc [m]	theta [°]	c [m]	x [m]	y [m]	Δx [m]	Δy [m]
0	0	75	89	23,03	85,97	0,000	0,00
1	0,1	76	89,1	21,56	86,45	-1,480	0,49
-1	0,1	74	89,1	24,56	85,65	1,524	-0,32
1	-0,1	76	88,9	21,51	86,26	-1,528	0,29
-1	-0,1	74	88,9	24,50	85,46	1,469	-0,51

Abbildung 4.4.: Verdeutlichung der maximal tolerierbaren Positionsabweichung bei fehlerbehafteten Messungen; eigene Abb.

Die körperbezogenen Navigationsdaten sollten die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Gierrate:
Auflösung von $0,0625^\circ/s$ bei $\pm 2000^\circ/s$
festgelegte, tolerierbare Abweichung von $\pm 1^\circ/s$ im Fall des Pedelecs; Daraus resultiert eine Abweichung $< \pm 0,1 m$ bei einer beispielhaften Geschwindigkeit von $1,5 m/s$
- Geschwindigkeit:
Durch Odometer im Vorfeld gemessen: 10 cm Abweichung bei 10 m Fahrt: 1% Abweichung;
eine tolerierbare Geschwindigkeitsabweichung liegt z.B. bei $\pm 0,5 m/s$;

Nach [37] ist eine GPS-Genauigkeit bzw. ein User Range Error von $< 7.0 m$ in 95% der Zeit für herkömmliche GPS-Empfänger anzunehmen. Wünschenswert wäre bei einer

Initialisierungs- und Kalibrierungsroutine eine ausreichend genaue globale Position ermitteln zu können, mit einem Fehlerradius von 1 m . Durch Mittlung aller GPS Werte bei einem Zustand in Ruhe über mehrere Minuten sollte dies angestrebt werden.

4.2.2. Genauigkeit der UWB-Messungen

Um die Genauigkeit der Distanzermittlung mit dem Setup um das Ranger4-Board zu bestimmen und mit der vorausgesagten Genauigkeit von $\pm 10\text{ cm}$ vergleichen zu können, fand im Vorfeld eine Voruntersuchung bei geringer Distanz statt. Die Abbildung 4.5 zeigt die Ergebnisse. Ersichtlich wird hier, dass die Genauigkeit zum einen innerhalb der Toleranz von $\pm 10\text{ cm}$ liegt. Zum anderen erhöht sich die Genauigkeit, je größer die Entfernung ist. Die Messungen fanden unter LOS-Bedingungen statt. Mit einem Maßband wurden vorab die wahren Distanzen bestimmt.

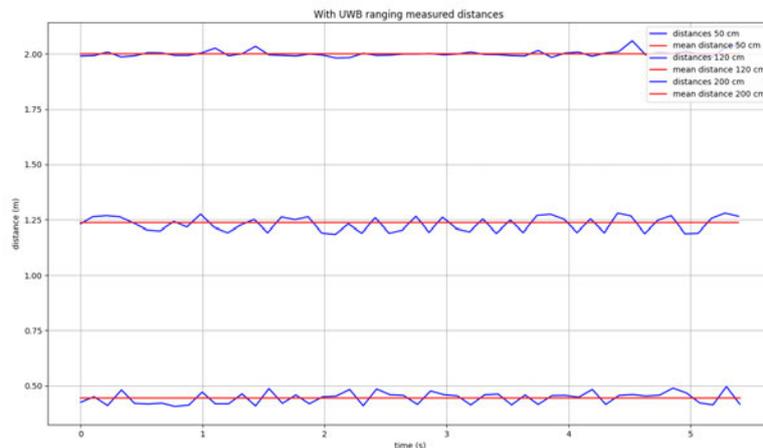


Abbildung 4.5.: Distanzmessungen mit zwei Ranger 4 Boards - Initiator und Responder - bei verschiedenen Distanzen. Es wurde über einen kurzen Zeitraum Werte ermittelt (blau) und jeweils der Durchschnitt (rot) gebildet. eigene Messungen;

LOS vs. NLOS

Die Genauigkeiten und Anforderungen der Distanzermittlung im Rahmen dieser Arbeit gelten für LOS-Bedingungen. Eine weitere Bedingung sollte sein, dass stetig Sichtbedingungen zu den Empfangsgeräten herrschen. Die Abbildung 4.6 zeigt den Einfluss von NLOS-Messungen. Die Firmware des UWB-Boards und des S32K144 Evaluationsboards ermöglichen NLOS-Erkennungen und Kompensierungen. Dennoch zeigt die Abbildung, dass Reflexionen und Kontaktabbrüche detektiert werden können. Durch erstere können Messungen teilweise Distanzen annehmen, die den Messbereich übersteigen. Das Signal legt einen sehr langen Weg zurück, bis es detektiert wird. Anders ist es bei Signalverlust. In diesem Fall wird repräsentativ ein Wert von -65 m gemessen. Die Werte $> 100\text{ m}$ und $< 0\text{ m}$ lassen sich hinterher gut filtern.

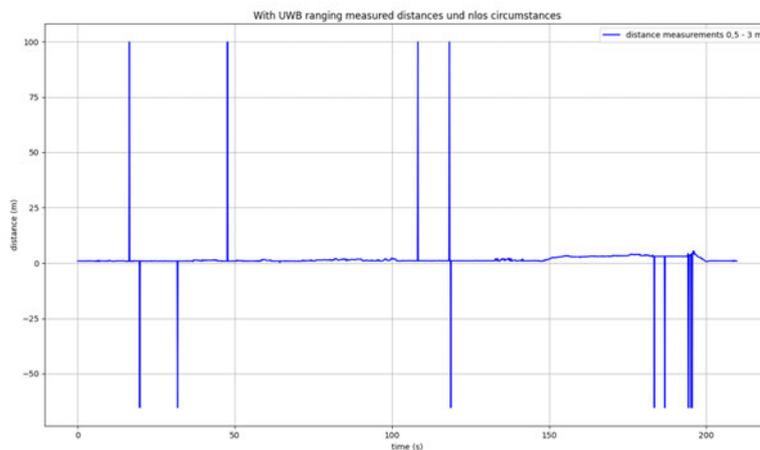


Abbildung 4.6.: Verdeutlichung der Positionsabweichung bei Fehlerhaften Messungen.

4.3. Existierende Lösungsansätze

In diesem Abschnitt werden vergleichbare existierende Lösungsansätze erwähnt, soweit sie in der Literatur zu finden sind. Trotz der Tatsache, dass UWB keine neue Technologie ist, hat die Recherche ergeben, dass sich Anwendungen zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit zumeist noch in einem Entwicklungsstadium befinden. Für hochpräzise Lokalisierung fanden jedoch verschiedene Untersuchungen statt. Die Kombination von GPS mit inertialer Sensorik findet bereits heute Anwendung.

Bluetooth 5.1

Mit dem BLE (Bluetooth Low Energy) 5.1 Standard lassen sich über das AoA-Verfahren Positionen vor allem für Innenraum-Anwendungen bestimmen. Dabei sind Lokalisierungen im Zentimeterbereich möglich. Eine empirische Studie hat hier beispielsweise einen durchschnittlichen Winkelfehler von 2° in einem speziellen Aufbau mit Antennenarrays ermittelt. Die Positionsabweichung wird mit $< 85\text{cm}$ in 95% der Zeit angegeben [21]. Dies erfüllt nicht die Anforderungen für Anwendungen im Bereich IoT, bei denen ein Positionsfehler von $< 10\text{cm}$ gefragt ist. Eine Lokalisierung im Zentimeterbereich verbleibt als Problemstellung.

UWB basierte Lokalisierung

Eine Untersuchung für Ultrabreitband im Straßenverkehr wird im Paper [51] beschrieben. Es werden zwei UWB -Anchor an den Seitenspiegeln eines Fahrzeugs montiert und Distanzen zu einem Tag¹ gemessen. In diesem Fall wird das TDOA Verfahren benutzt. Die Distanzen von beiden Anker, deren Positionen am Fahrzeug bekannt sind, werden zum Tag gemessen und über Triangulationstechniken die Position des Tags ermittelt. Das Ergebnis der Studie besagt, dass Abweichungen auf horizontaler Ebene von bis zu 1 m entstehen kann. Dies kann für Anwendungen mit sehr hoher Genauigkeitsanforderung bereits unzureichend sein.

GNSS, IMU und UWB basierte Lokalisierung

Studien wie [27] und [30] zeigen, dass eine Kombination aus GPS, IMU und UWB-basierter Sensorik bereits untersucht wurden. Die experimentellen Ergebnisse haben in beiden Fällen eine eindeutige Verbesserung der Lokalisierung ergeben. Letztere Studie schlägt zudem

¹ Tag: engl. für Anhänger, Schild, Marke; Kleiner Sender, der beim UWB-Ranging involviert ist;

einen möglichen Einsatz für die Steigerung der Sicherheit von schwachen Verkehrsteilnehmern (VRU) vor und präsentiert dabei einen Prototypen. Es existieren zahlreiche weitere Untersuchungen zu dem Thema Lokalisierung mit der Kombination aus GNSS, UWB und zusätzlich einer IMU. Für die Fusionierung der Sensordaten wurde häufig ein Kalman Filter - bzw. für nichtlineare Funktionen ein erweiterter Kalman-Filter - verwendet. Auch in der vorliegenden Masterarbeit wird dieser thematisiert und wurde bereits im Grundlagenteil beschrieben.

4.4. Schlussfolgerungen

Die existierenden Ansätze zeigen verschiedene Untersuchungen zur Lokalisierung. Es wird deutlich, dass eine Bestimmung über den AoA bei zum Beispiel 2° Abweichung eine hohe Ungenauigkeit zur Folge hat. Dies bestätigt auch eine eigene Analyse in der Tabelle 4.3 bei einer Distanz von 100 m. Dies hat besondere Ansprüche für die AoA-Bestimmung zur Folge. Eine Kombination mehrerer Sensoren scheint in allen recherchierten Fällen eine Verbesserung der Genauigkeit herbeizuführen. Dabei hilft der Einsatz eines Kalman-Filters. Eine Positionsbestimmungsmethode, die den Anforderungen und Randbedingungen gerecht wird, soll im nachfolgenden Abschnitt in einem Konzept vorgestellt und anschließend evaluiert werden.

5. Konzeption

Nachdem aus dem Analyseteil ein Anforderungsprofil für eine adäquate Positionsbestimmung hervorgegangen ist, wird in diesem Kapitel das Konzept zur Umsetzung erläutert. Zunächst wird das System allgemein beschrieben, bevor die Vorverarbeitung der Daten, die gewählte Positionsbestimmungsmethode und die darauf basierende Navigation des Prototypen gezeigt wird.

5.1. Systemarchitektur

Das Systemdiagramm in der Abbildung [5.1](#) zeigt die beteiligten Technologien, die für eine akkurate Positionsbestimmung im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden. Eine Lichtsignalanlage ist mit Ultrabreitband-Technologie und zudem mit einer MK5 OBU ausgestattet worden. Über die OBU werden V2X-Informationen der Kreuzung versendet. Im Speziellen werden die V2X-MAPEM-Nachrichten verarbeitet. Diese liefern einen geografischen Plan der Kreuzung und mögliche Fahrmanöver mit Fahrspurverbindungen. Wie die Nachricht aufgebaut ist, wird im Abschnitt [5.4](#) gezeigt. Das Lastenfahrrad erhält über GNSS die aktuelle globale Position. Die Information dafür wird von der On-Board-Unit bereitgestellt. Gleichzeitig empfängt die OBU des Pedelecs auch die V2X-Nachrichten der als RSU konfigurierten Lichtsignalanlage. Eine lokale Positionsermittlung soll über die Distanzbestimmung mit UWB kombiniert mit weiteren Sensoren der inertialen Messeinheit, sowie dem Odometer geschehen. Die Verarbeitung erfolgt im zentralen Mikrocontroller des Pedelecs mit dem Ziel, die Position möglichst präzise abschätzen zu können und die nächste ermittelte Zielposition, autonom anzufahren.

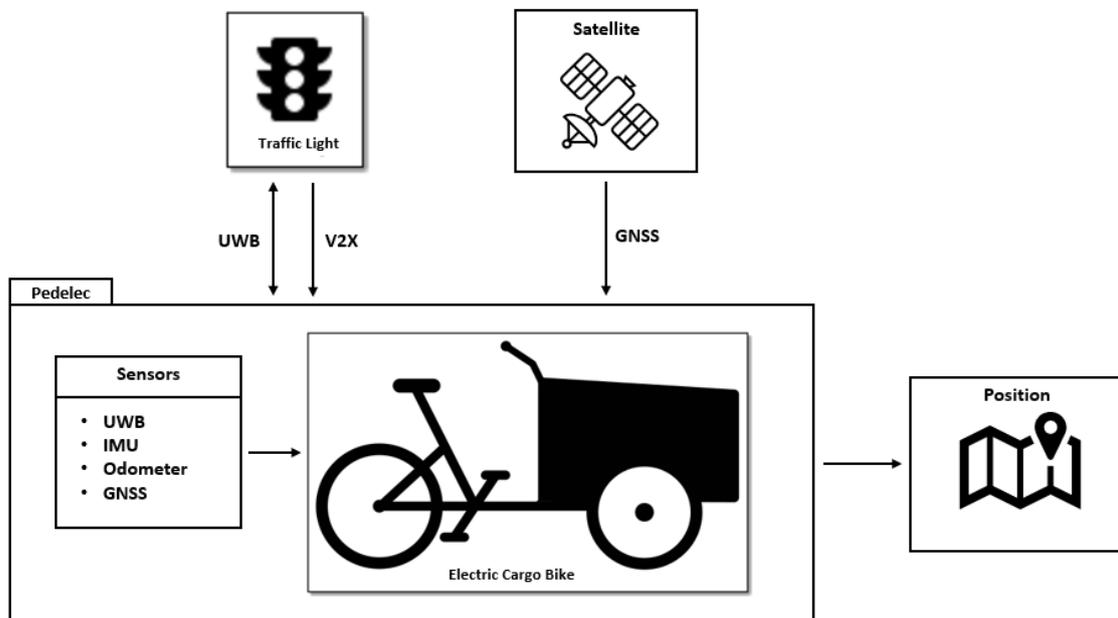


Abbildung 5.1.: Die Grafik zeigt einen vereinfachten Überblick vom System

5.2. Positionsbestimmungsmethode

Im folgenden Abschnitt wird die Methode erläutert, mit der eine infrastrukturunterstützte Positionsbestimmung ermöglicht wird. Die eingesetzte Ultrabreitband-Technologie fungiert als Messmethode für Distanzmessungen und spielt eine wesentliche Rolle bei der Lokalisierung. Neben der Distanz zum Objekt wird auch der Winkel benötigt, der die Richtung angibt, aus der das Signal des Senders kommt. Dieses Prinzip ist unter dem Begriff „AoA - Angle of Arrival“ bekannt. Wie im Grundlagenkapitel erläutert, ist die Ermittlung einer Richtung eines Signals über ein Array von Empfängern möglich, welche durch die Phasenunterschiede der ankommenden Signale einen Winkel bestimmbar machen. Da die für diese Arbeit verwendete UWB-Hardware ohne AoA-Funktion vorlag, wurde diese Funktion durch eine indirekte Winkelbestimmung über die Lageänderung des Pedelecs ersetzt. Der Vorteil der Bestimmung einer Position über die Distanz und einen Ankunftsinkel liegt am geringen Hardwareaufwand. Im Gegensatz zur Multilateration, bei der mindestens drei Ankerpunkte gebraucht werden, kommt die Technologie mit einem in der Infrastruktur installierten Ankerpunkt und einem auf dem Fahrzeug fixierten Initiator aus. Um die Genauigkeit zu erhöhen, können weitere Anker verwendet werden.

5.2.1. Lagebestimmung

Um zu jedem Zeitpunkt die Lage zur Straße vom Pedelec abschätzen zu können, wird ein Komplementär-Filter verwendet. Dieser liefert den Roll-, Neigungs- und Gierwinkel. Eine Berechnung der Lage ausschließlich über das Gyroskop kann wegen des durch die Integration entstehenden Drifts über einen längeren Zeitraum das Ergebnis verzerren. Eine Kombination aus Beschleunigungssensor und Drehratensensor (Gyroskop) via Komplementär-Filter hilft hingegen dabei, eine möglichst rausch- und driftarme Lagebestimmung zu ermöglichen. Auch wenn diese im 2D-Koordinatenfeld und im Speziellen für diese Demo eine untergeordnetere Rolle spielt, kann die Information für mögliche Erweiterungen genutzt werden.

5.2.2. Richtungsbestimmung

Eine Richtungsbestimmung ist theoretisch anhand des Magnetometers der IMU möglich. Jedoch ist eine Ungenauigkeit und Unzuverlässigkeit bei Voruntersuchungen zum Vorschein gekommen. Andernfalls wäre die Bestimmung des Headings auf diese Weise eine praktische Lösung. Da die Messungen der Richtung von der Realität jedoch stark abweichen, wird bei der Initialisierung eine Richtung über die GPS-Koordinaten veranlasst. Dies hat den Nachteil, dass das Pedelec zu Beginn auf einen definierten Startpunkt ohne Abweichungen platziert werden muss. Da die Testumgebung der Demonstration in einem von hohen Gebäuden (NXP-Gebäude) abgedeckten Bereich aufgebaut wurde und die GPS-Koordinatenermittlung auch nach sehr langem Warten unbefriedigende Ergebnisse ergeben hat, wurde der Startpunkt hart codiert. Die Abbildung 5.2 zeigt die aus dem Magnetometer ermittelte Richtung im Verlauf einer Testfahrt (226°). Die eigentliche Fahrtrichtung zu Beginn beträgt 256° . Aufgrund der suboptimalen Ergebnisse und da die IMU einen festen Platz auf dem Pedelec hat und eine Kalibrierung nicht über Bewegung des Pedelecs im Raum stattfinden kann (wie man es bei Drohnen oder einem Smartphone handhabt), stellt sich der Einsatz des Magnetometers als nicht optimal heraus.

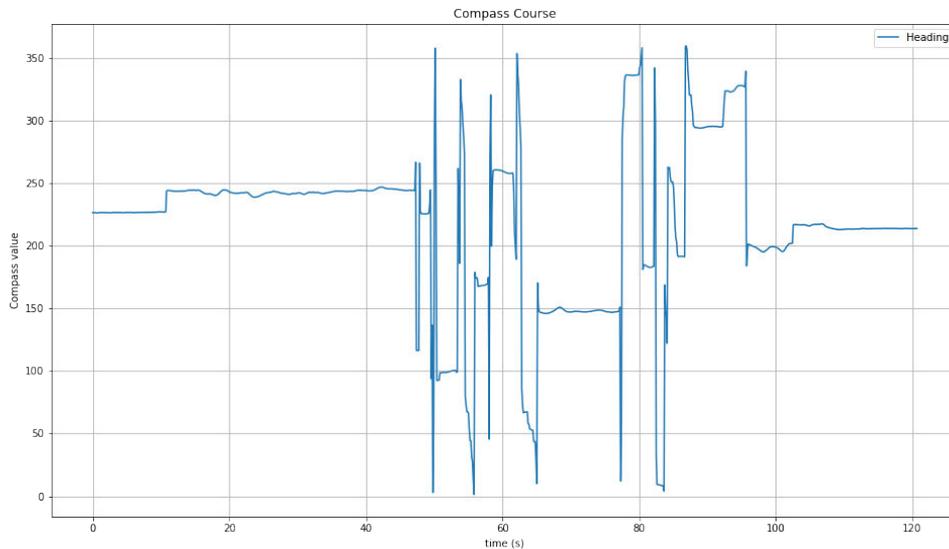


Abbildung 5.2.: Bestimmung der Fahrtrichtung über das Magnetometer der IMU.

Die Berechnung erfolgt über den folgenden Code-Ausschnitt nach [3]:

```

1 def determine_direction(mag_x, mag_y):
2     # direction determination
3     if mag_y > 0:
4         direction = 90 - (np.arctan( mag_y / mag_x ) *
5                             (180/np.pi))
6     elif mag_y < 0:
7         direction = 270 - (np.arctan(mag_y / mag_x ) *
8                             (180/np.pi))
9     elif mag_y == 0 and mag_x < 0:
10        direction = 180.0
11    elif mag_y == 0 and mag_x > 0:
12        direction = 0.0
13
14    return direction

```

Listing 5.1: Python Code zur Richtungsbestimmung aus Magnetometer-Werten

5.2.3. Bestimmung des AoA

Die Veränderung der Richtung des Pedelecs kann über das Gyrometer der inertialen Messeinheit verfolgt werden. Das Gyrometer liefert über die Z-Achse die Drehung des Pedelecs

pro Zeit. Durch die Integration der diskreten Gyrometer-Werte kann zu jedem Zeitpunkt der Winkel bestimmt werden, um den sich das Pedelec seit der initialen Zuweisung eines Anfangswinkels verändert hat. Ein initialer Anfangswinkel kann über die Berechnung aus zwei GPS-Koordinatenpunkten bestimmt werden. So ist es möglich über den Referenzpunkt der Kreuzung, der durch die RSU via V2X-MAPEM-Nachricht bekanntgegeben wird und der Position auch die Lage des Pedelecs im Verhältnis zum Referenzpunkt der Kreuzung zu bestimmen.

So bekommt man eine Anfangsrichtung und kann die Änderung der Richtung vom UWB-Referenzpunkt aus über die Veränderung der Lage vom Pedelec durch Auswertung der Gyroskop-Daten der IMU messen. Die Grafik 5.3 veranschaulicht das mathematische Prinzip hinter der Positionsbestimmungsmethode.

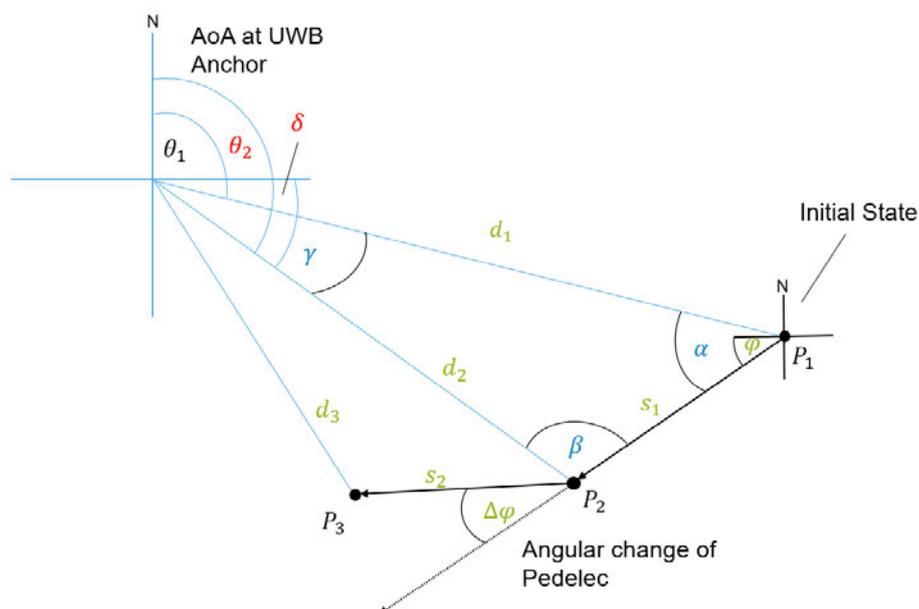


Abbildung 5.3.: Bestimmung der Position durch Anwendung trigonometrischer Funktionen; In grün sind die gegebenen und in rot die gesuchten Parameter gekennzeichnet. eigene Abb.;

Von der fixen Position des an der Ampel installierten UWB Anchors ist die Ermittlung der Richtung zum Punkt P_1 möglich. So ergibt sich der initiale Richtungswinkel θ . Nach der Bewegung des Pedelecs zum Punkt P_2 um die Distanz s_1 kann eine weitere Distanzermittlung mit d_2 erfolgen. Das nun aufgespannte Dreieck lässt sich mit den bekannten Seiten d_1 , d_2 und s_1 beschreiben. Der Winkel α ist über den Scheitelwinkel durch θ und die Lage des Pedelecs am Punkt P_1 ebenfalls bekannt.

Es lässt sich nun über den Sinussatz mit:

$$\frac{d_2}{\sin(\beta)} = \frac{s_1}{\sin(\gamma)} \quad (5.1)$$

die Veränderung des AoA θ wie folgt bestimmen:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{s_1 \cdot \sin(\beta)}{d_2}\right) \quad (5.2)$$

Der Winkel γ stellt also die Änderung des Angle of Arrival dar. Die Lageänderung des Pedelecs, welche über die Daten des Gyrometers bestimmbar sind, ist im Winkel $\Delta\varphi$ gespeichert. Dies führt zu einer Veränderung des im Sinussatz beschriebenen Verhältnisses zwischen Winkel und Seitenlängen des Dreiecks.

5.2.4. Positionsberechnung

Die Position P_2 des Pedelecs lässt sich nun über die trigonometrischen Operationen 5.3 und 5.4 bestimmen.

$$x = d_2 \cdot \cos(\delta) \quad (5.3)$$

$$y = d_2 \cdot \sin(\delta) \quad (5.4)$$

δ setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$\delta = 90 - \theta_2 \text{ bzw. } \delta = \theta_1 - 90 + \gamma \quad (5.5)$$

Der Winkel δ ist hierbei der von der X-Achse im UWB-Referenzkoordinatensystem und des Distanzvektors eingeschlossene Winkel.

Abhängig davon, in welchem Quadranten sich das Pedelec vom UWB Anchor an der Lichtsignalanlage aus befindet und abhängig davon, in welchen Quadranten der Geschwindigkeitsvektor vom Pedelec zeigt, wird der Winkel δ entsprechend der Tabelle 5.1 bestimmt. Die Grafik 5.4 zeigt beispielhaft den Fall für das Zeigen der Distanz-Vektoren in den dritten und des Geschwindigkeitsvektors in den zweiten Quadranten. Letztere sind nach Winkel-Bereichen von 0 bis 360 Grad wie folgt unterteilt:

- $0^\circ \dots 90^\circ$ - 1. Quadrant
- $90^\circ \dots 180^\circ$ - 2. Quadrant

- $180^\circ \dots 270^\circ$ - 3. Quadrant
- $270^\circ \dots 360^\circ$ - 4. Quadrant

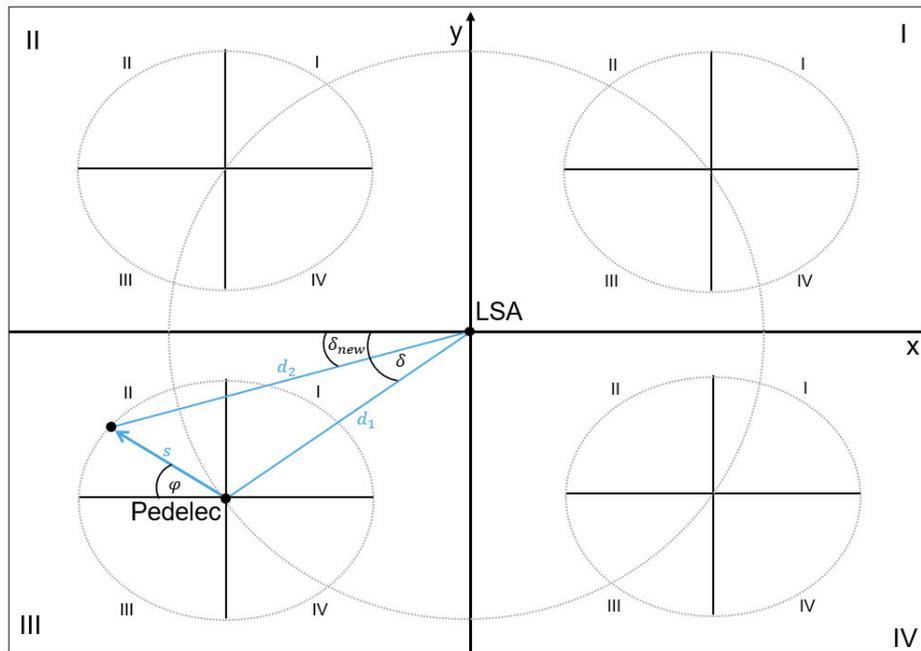


Abbildung 5.4.: Quadranten-Ansicht für Lichtsignalanlage und Pedelec; Abhängig der Quadranten werden Fallunterschiede zur Berechnung des Winkels berücksichtigt [47].

Tabelle 5.1.: Fallunterscheidungen und Berechnungen für die Winkel beim Positionsbestimmungsalgorithmus

Quadranten		Winkel			
LSA	Pedelec	$\varphi < \delta$		$\varphi \geq \delta$	
I \wedge I, II \wedge II, III \wedge III, IV \wedge IV		$\beta = 90 + \delta' + \varphi$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$	$\beta = 90 + \delta + \varphi'$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$
I	II	$\beta = \varphi + \delta$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \varphi + \delta$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$
I	III	$\beta = \delta - \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \delta' - \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
I	IV	$\beta = \delta' + \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$	$\beta = \delta' + \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
II	I	$\beta = \delta' + \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \delta' + \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$
II	III	$\beta = \delta' + \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$	$\beta = \delta' + \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
II	IV	$\beta = \delta - \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \delta' - \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
III	I	$\beta = \delta - \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \varphi - \delta$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
III	II	$\beta = \varphi' + \delta'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$	$\beta = \varphi' + \delta'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
III	IV	$\beta = \delta + \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \delta + \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$
IV	I	$\beta = \delta' + \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$	$\beta = \delta' + \varphi'$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
IV	II	$\beta = \varphi' - \delta'$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \varphi - \delta$	$\delta_{new} = \delta - \gamma$
IV	III	$\beta = \delta + \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$	$\beta = \delta + \varphi$	$\delta_{new} = \delta + \gamma$

5.2.5. Positionsbestimmungsalgorithmus

Die Positionsbestimmungsmethode über Ultrabreitband-Distanzmessung und Ankunftsinkelbestimmung wird im Diagramm der Abbildung 5.5 veranschaulicht. Die Richtung in die das Pedelec zu Beginn steuert, muss am Anfang initialisiert (*init bearing*) werden. Im weiteren Verlauf wird die Lageveränderung des Pedelecs über das Gyroskop verfolgt und mit $gyro_z$ dem System zugeführt. Der daraus berechnete Gierwinkel (*yaw*) wird mit der vorherigen Lage (*bearing*) addiert und daraus die neue Lage und ein zur X-Achse relativer Winkel φ im Koordinatensystem der Kreuzung bestimmt. Die Anfangsposition des Pedelecs hat einen initialen Ankunftsinkel zur Folge der mit Hilfe der vorher bestimmten Variablen, sowie der zurückgelegten Strecke s und dem Betrag des UWB-Distanzvektors d , im Verlauf der Fahrt iterativ bestimmbar ist. Im letzten Schritt wird die neue Position des Pedelecs ermittelt. Die Beschreibungen der genannten Variablen sind in Tabelle 5.2 aufgelistet.

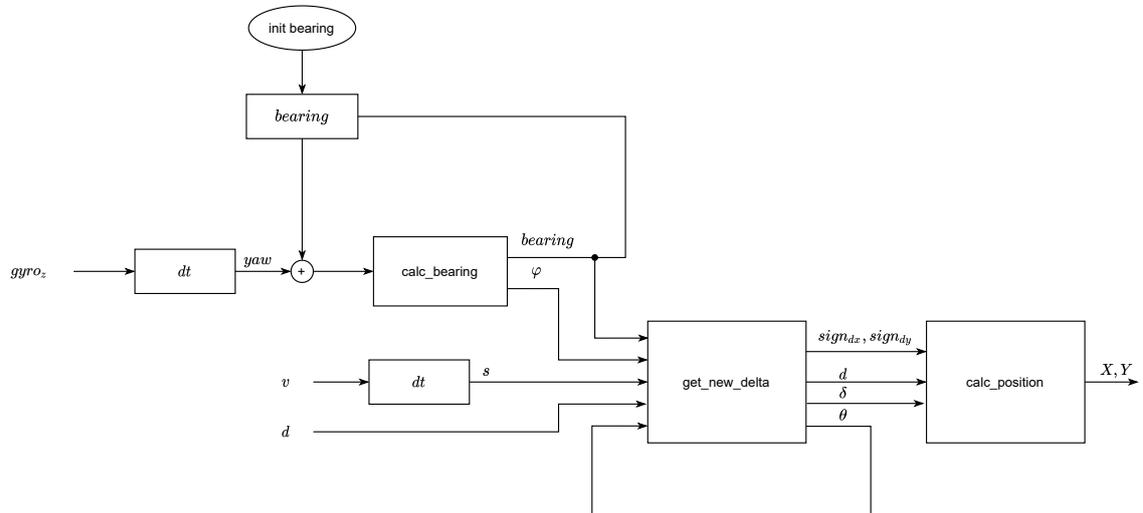


Abbildung 5.5.: Übersicht der einzelnen Schritte der Positionsbestimmungsmethode.

Tabelle 5.2.: Variablen und Beschreibungen vom Positionsbestimmungsalgorithmus

Variable	Beschreibung	Einheit
$gyro_z$	Winkeländerung pro Zeitintervall	$\left[\frac{^\circ}{s}\right]$
$bearing$	Steuerkurs vom Pedelec	$[^\circ]$
v	Geschwindigkeit vom Pedelec	$\left[\frac{m}{s}\right]$
d	UWB -Distanzvektor	$[m]$
θ	Angle of Arrival (Ankunftswinkel) am UWB-Anker der LSA	$[^\circ]$
δ	Winkel zwischen UWB-Distanzvektor und X-Achse	$[^\circ]$

5.2.6. Sensorfusion

Mit der Implementierung eines erweiterten Kalman-Filters, soll überprüft werden, ob sich die Genauigkeit durch zusätzliche Sensorfusion verbessern lässt. Wie im Analyseteil bereits erwähnt, finden sich in der Literatur Ansätze, bei denen eine Kombination der Sensordaten von GNSS und einer IMU benutzt wurde. Aufgrund der Ungenauigkeit von GNSS wurde von einer solchen Kombination abgesehen. Stattdessen sollen die aus der UWB-Lokalisierung ermittelten Werte mit der Gierrate der IMU und den Geschwindigkeitsdaten des Odometers fusioniert werden. Der Gierwinkel des Gyroskops aus der Tabelle 5.2 $gyro_z$ sei hier ϕ . Das Pedelec hat mit der x- und y- Position, dem Gierwinkel ϕ und der Geschwindigkeit v den folgenden Zustandsvektor zum Zeitpunkt t :

$$x_t = [x_t, y_t, \phi_t, v_t] \quad (5.6)$$

Der Eingangsvektor beinhaltet die Geschwindigkeit des Pedelecs v und die Gierrate vom Gyroskop ω .

$$u_t = [v_t, \omega_t] \quad (5.7)$$

Die UWB Positionswerte werden über den Beobachtungsvektor y eingebunden.

$$y_t = [x_{UWB,t}, y_{UWB,t}] \quad (5.8)$$

Die Zustandsgleichung lautet wie folgt:

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t \quad (5.9)$$

Die Kontrolleingabematrix enthält das Bewegungsmodell des Pedelecs. Nach dem *Dead Reckoning* Prinzip, lässt sich die Position des Pedelecs mit der Geschwindigkeit v , dem Zeitschritt dt und dem Gierwinkel ϕ wie folgt bestimmen:

$$x = v \cdot dt \cdot \cos(\phi) \quad (5.10)$$

$$y = v \cdot dt \cdot \sin(\phi) \quad (5.11)$$

Mit der Zustandsübergangs-Matrix bzw. Transitionsmatrix A und der Kontrolleingabematrix B ergibt sich für den nächsten Zustand:

$$x_{t+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \phi_t \\ v_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \phi_t \cdot dt & 0 \\ \sin \phi_t \cdot dt & 0 \\ 0 & dt \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_t \\ \omega_t \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Mit der Jacobimatrix soll die nichtlineare Funktion partiell linearisiert werden.

$$J_A = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dx} & \frac{dx}{dy} & \frac{dx}{d\phi_t} & \frac{dx}{dv} \\ \frac{dy}{dx} & \frac{dy}{dy} & \frac{dy}{d\phi_t} & \frac{dy}{dv} \\ \frac{d\phi_t}{dx} & \frac{d\phi_t}{dy} & \frac{d\phi_t}{d\phi_t} & \frac{d\phi_t}{dv} \\ \frac{dv}{dx} & \frac{dv}{dy} & \frac{dv}{d\phi_t} & \frac{dv}{dv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_t \cdot \cos \phi_t \cdot dt & \cos \phi_t \cdot dt \\ 0 & 1 & v_t \cdot \sin \phi_t \cdot dt & \sin \phi_t \cdot dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Für die Beobachtung mit der UWB-Positionsbestimmungsmethode wird das folgende Modell benutzt:

$$y_t = C x_t \quad (5.14)$$

Die Beobachtungsmatrix C ist:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Für die lineare Annäherung kann auch hier die Jacobimatrix gebildet werden zu:

$$J_C = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dx} & \frac{dx}{dy} & \frac{dx}{d\phi} & \frac{dx}{dv} \\ \frac{dy}{dx} & \frac{dy}{dy} & \frac{dy}{d\phi} & \frac{dy}{dv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Die beschriebenen Zustandsmatrizen und -variablen wurden in einem Prädiktions- und Updateschritt implementiert. Diese sind aus dem Abschnitt 2.6.3 bereits bekannt. Für das Prozess- und Messrauschen wurden die folgenden Kovarianzmatrizen festgelegt. Für die Messungen mit der UWB-Positionsbestimmungsmethode lautet die Matrix mit einer angenommenen Varianz von 2 m:

$$R = \begin{bmatrix} 2^2 & 0 \\ 0 & 2^2 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Das Prozessrauschen wurde mit der folgenden Kovarianzmatrix Q bedacht. Die Varianzen entsprechen den Anforderungen, welche sich im Analyseanteil ergeben haben. Die Positions-Varianz des Pedelegs aus der Koppelnavigation (Dead Reckoning) wird hier mit 0,1 m bedacht.

$$Q = \begin{bmatrix} 0,1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5^2 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Die Implementierung des erweiterten Kalman-Filters wurde in Python nach dem Beispiel [44] vorgenommen.

5.2.7. Navigationsalgorithmus

Neben dem primären Ziel der Masterarbeit, eine genauere Positionsbestimmungsmethode im urbanen Raum zu finden und zu untersuchen, existiert ein sekundäres Ziel. Dieses besteht darin, dass ein gegebener Parcours autonom abgefahren werden soll. Beim Ansteuern einer Kreuzung kann mit Hilfe der globalen Position und des Steuerkurses ermittelt werden, aus welcher Richtung und auf welche Fahrspur das betreffende Fahrzeug zusteuert. Die Informationen sind über GNSS ermittelbar und werden über die ETSI-Applikation bereitgestellt. Im Fall des prototypischen Aufbaus und der damit verbundenen Demo, wird ein Demo-String initialisiert. Dieser enthält die Fahrspur-Identifikationsnummern. Die Informationen dafür werden aus der MAPEM-Nachricht gewonnen. Diese enthält zudem die für eine Navigation notwendigen Fahrspurkoordinaten. Für die Demo-Kreuzung auf dem NXP-Gelände hat dieser beispielsweise den Inhalt: $(10,20,30,11)$. Vom Start bis zum Ende sind die Koordinaten der Fahrspuren abzufahren, welche in den Lane-Nodes der jeweiligen LaneIDs der MAPEM abgespeichert sind. Der Navigationsalgorithmus berechnet die nächstgelegene Koordinate der Fahrspur, auf der sich das Pedelec zum aktuellen Zeitpunkt befindet. Aus der Position des Pedelecs und der als nächstes anzusteuern Lane-Koordinate wird ein Fehlerwinkel bestimmt, der dem Servomotor-Controller übergeben wird. Dieser reagiert mit einer Lenkwinkeljustierung auf den Stellwert. Der Servo-Controller besteht im wesentlichen aus einem P-Regelglied, das die gewünschte Stellung des Motors so schnell wie möglich ohne Überschwingen ansteuert. In der Abbildung 5.6 ist der zuvor beschriebene Aufbau der Navigation noch einmal verdeutlicht.

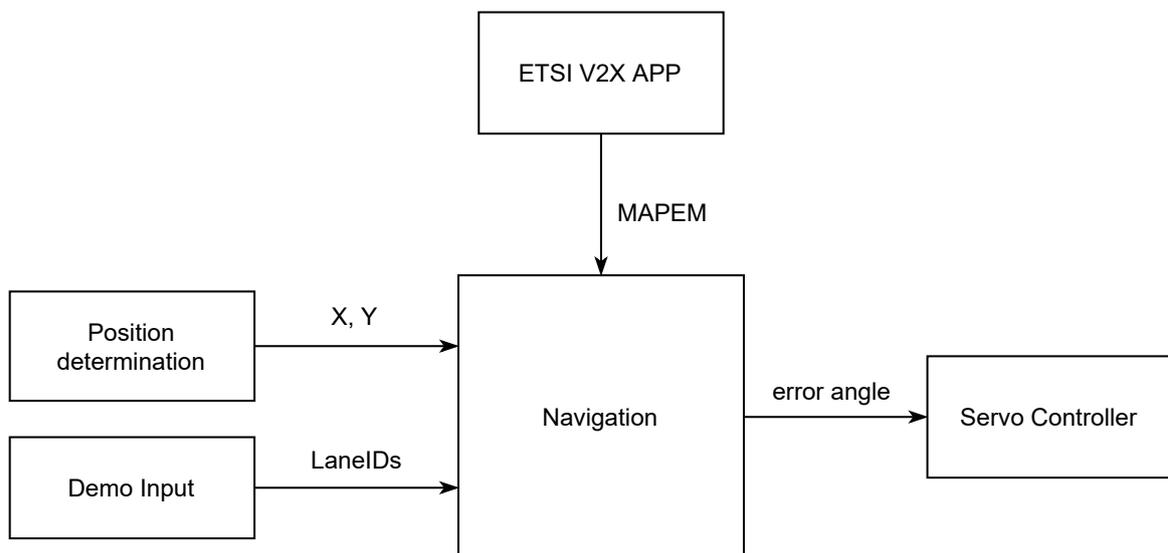


Abbildung 5.6.: Blockschaltbild vom Konzept der Navigation.

5.3. Vorverarbeitung der Daten

Da die IMU-Rohdaten verrauscht sind, müssen diese vor der Weiterverarbeitung bearbeitet werden. Eine Kalibrierungs-Routine direkt nach Beginn der Messungen ermittelt vorab einen Mittelwert, der den systematischen Bias¹-Fehler ausgleichen soll. Dieser wird in Ruhestellung bestimmt und dient im weiteren Verlauf zum Ausgleich des Offset-Drifts vom Gyroskop. Die Störungen bei der Distanzbestimmung, welche durch NLOS-Bedingungen, oder Reflexionen entstehen können, sind mit einem Tiefpassfilter kompensierbar. Die Bildung eines gleitenden Mittelwertes stellt einen solchen Tiefpassfilter dar. Bei dieser Methode wird zu einem bestimmten Zeitpunkt der Mittelwert einer gegebenen Anzahl an benachbarten Datenpunkten berechnet. Der diskrete Filter hat die mathematische Form [13]:

$$y[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x[n-k] \quad (5.19)$$

Die Abbildung 5.7 zeigt einen Vergleich der Rohmesswerte mit zwei Filterarten. Zum einen wird ein herkömmlicher Tiefpassfilter angewandt und zum anderen wird der gleitende Mittelwert gebildet. Im Rahmen dieser Arbeit werden in einem Zeitschritt zwei Rohdatenwerte der Distanzen aufgefasst und gemittelt. Es wird zudem eine Plausibilitätsprüfung durch Varianzermittlung der Messwerte durchgeführt. Weichen die Werte zu stark ab, werden die zuvor ermittelten plausiblen Messwerte benutzt. Für letztere Prüfung eignet sich die Anwendung einer gleitenden Mittelwertbildung besonders gut, da die Sprünge von plausiblen Messwert zum nicht-plausiblen größer sind und damit auch die Varianz höher ist.

¹ *Bias*: auch Verzerrung; Ein systematischer Fehler, der nicht zufällig auftritt und von der Spezifikation eines Sensors abhängt;

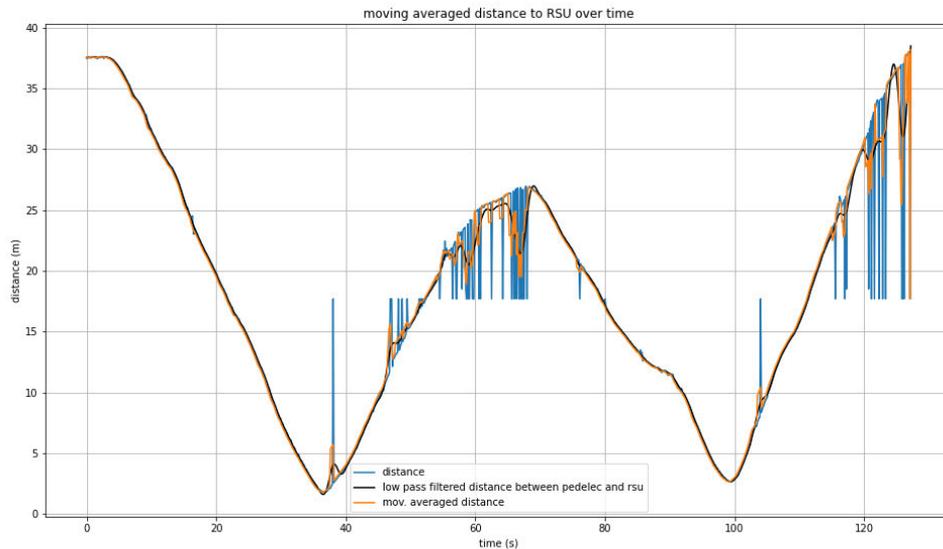


Abbildung 5.7.: Filterung der Distanzwerte: Tiefpassfilter und gleitender Mittelwert zur Kompensierung von Messabweichungen durch NLOS oder Reflexionen. Abb. eigener Messungen;

5.4. Aufbau der Demo-Kreuzung

Dieser Abschnitt behandelt die Karte einer Kreuzung, welche als Beispiel für eine im Straßenverkehr real vorkommende Kreuzung dient. Die Informationen für letztere liefert die V2X-MAP-Nachricht [25]. Sie enthält neben der Identifikationsnummer zur eindeutigen Zuordnung unter anderem auch den GNSS-Referenzpunkt der Kreuzung. Auf diesen beziehen sich die zur MAP-Nachricht gehörenden Fahrspurinformationen. Eine Fahrspur ist jeweils mit mehreren X- und Y- Koordinaten beschrieben. Die Koordinaten der Fahrspuren wurden mit einem Tool erzeugt. Die Informationen aus der MAP-Nachricht sollen für eine Fahrspuzuordnung und eine autonome Steuerung im Rahmen dieser Masterarbeit genutzt werden.

Die Abbildung 5.8 zeigt eine Karte der Demo-Kreuzung mit den eingetragenen Fahrspuren auf dem NXP-Gelände in Hamburg. Eine über den WLAN Standard 802.11p ausgesendete ETSI-ITS MAPEM Nachricht hat den folgenden, in der Abbildung 5.9 gezeigten Aufbau. Neben der Identifikationsnummer lassen sich die Koordinaten der Fahrspuren und Verbindungen entnehmen. Eine Wichtige Information ist zudem der Referenzpunkt der Kreuzung. Dieser ist im vorgestellten Konzept der Koordinatenursprung. Die nächstgelegenen Koordinaten der Fahrspuren beziehen sich immer auf den Referenzpunkt. Die weiter entfernten



Abbildung 5.8.: Zu sehen ist die kreierte NXP MAP, auf der die Tests gefahren werden. Lanes und Signalgruppen sind definiert und GPS-Marker eingetragen. Die MAP wird in der rsu.cfg der V2X Software hinterlegt.

Koordinaten der Fahrspuren beziehen sich wiederum auf die Koordinaten vor ihnen. Es wird also das Delta zum vorherigen Koordinatenpunkt angegeben.

```

▼ IntersectionGeometry
  ▼ id
    id: 20307 (0x4f53)
    revision: 1
  ▼ refPoint
    lat: Unknown (535831600) (53,5831600 deg)
    long: Unknown (99573200) (9,9573200 deg)
  ▼ laneSet: 6 items
  ▼ Item 0
    ▼ GenericLane
      laneID: 10
      ▼ laneAttributes
        directionalUse: 80 [bit length 2, 6 LSB pad bits, 10.. .... decimal value 2]
        sharedWith: 0000 [bit length 10, 6 LSB pad bits, 0000 0000 00.. .... decimal value 0]
        ▼ laneType: vehicle (0)
          .... ..1. Extension Present Bit: True
          vehicle: 0000 [bit length 16, 0000 0000 0000 0000 decimal value 0]
        ▼ nodeList: nodes (0)
        ▼ nodes: 3 items
        ▼ Item 0
          ▼ NodeXY
            ▼ delta: node-XY6 (5)
              ▼ node-XY6
                x: 396
                y: 222
          ▼ Item 1
            ▼ NodeXY
              ▼ delta: node-XY6 (5)
                ▼ node-XY6
                  x: 924
                  y: 222
          ▼ Item 2
            ▼ NodeXY
              ▼ delta: node-XY6 (5)
                ▼ node-XY6
                  x: 1188
                  y: 222
        ▼ connectsTo: 2 items
        ▼ Item 0
          ▼ Connection
            ▼ connectingLane
              lane: 20
              ▶ maneuver: 8000 [bit length 12, 4 LSB pad bits, 1000 0000 0000 .... decimal value 2048]
              signalGroup: 1
        ▼ Item 1
          ▼ Connection
            ▼ connectingLane
              lane: 31
              ▶ maneuver: 2000 [bit length 12, 4 LSB pad bits, 0010 0000 0000 .... decimal value 512]
              signalGroup: 1
        ▶ Item 1
        ▶ Item 2
        ▶ Item 3
        ▶ Item 4

```

Abbildung 5.9.: Aufbau einer V2X ETSI ITS G5 MAPEM Nachricht;

6. Entwicklung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung vom Hardwareaufbau und die Entwicklung von Softwarekomponenten des im Konzept gezeigten Systems beschrieben. Der prototypische Hardwareaufbau am Pedelec besteht im wesentlichen aus den zur Positionsbestimmung notwendigen Sensoren. Die Lichtsignalanlage hat lediglich einen provisorischen, reduzierten Aufbau. Die Software wurde so modular wie möglich entwickelt, sodass sich einzelne Module austauschen lassen.

6.1. Hardwareaufbau

Zur Vereinfachung werden nicht alle am Pedelec implementierten Hardwarebauteile erläutert, sondern lediglich die für die Masterarbeit notwendigen Hardwareerweiterungen und Verbindungen aufgezeigt. Bei der Lichtsignalanlage fehlt mit dem Anzeigen der Ampelphase eine wesentliche Funktion einer Ampel. Diese ist für die Demo jedoch nicht ausschlaggebend. Der Hardwareaufbau beschränkt sich auch hierbei nur auf die für eine Positionsermittlung notwendige Hardware.

6.1.1. Pedelec Hardwareaufbau

Die Abbildung [6.1](#) zeigt den elektrischen Hardwareaufbau des Pedelecs.

Das Ultrabreitband Board *Ranger4* ist mitsamt dem S32K144 Evaluationsboard an erhöhter Position am Lenker befestigt. Letzteres wird über USB mit dem Boardcomputer *Raspberry Pi 4 B+* mit Energie versorgt. Die Distanzwerte werden ebenfalls über die serielle USB-Schnittstelle übertragen. Das *Ranger4* Board auf dem Pedelec fungiert als Initiator des Ranging-Prozesses, der im Grundlagenkapitel [2.2.2](#) beschrieben wird. Bei der Platzierung wurde Wert auf eine Vermeidung von Sichtabdeckung gelegt. Die Höhe der Anbringung entspricht in etwa der gleichen Installationshöhe des UWB-Boards an der Lichtsignalanlage. So entspräche die gemessene Distanz, der wahren Distanz ohne zu beachtende Höhenunterschiede. Zur Vereinfachung wird die Demokreuzung als Ebene Fläche angesehen. Die inertiale Messeinheit ist mit dem Raspberry über den I2C-Bus verbunden. Sie wurde mittig des Pedelecs mit einem leicht federnden Material auf dem Servomotor verbunden. Auf diese

Weise sollen Vibrationen kompensiert werden. Die Geschwindigkeitsmessung findet wie bei Fahrrädern üblich über einen Hall-Sensor statt, der auf die in den Speichen am Hinterrad befestigten 9 Magneten reagiert. Jeder sich nähernde Magnet löst einen Spannungseinbruch aus. Diese werden softwareseitig gezählt. Die On-Board-Unit ist über die Netzwerkschnittstelle *MQTT* mit dem Raspberry verbunden. Dies wird im Softwareaufbau näher beschrieben.

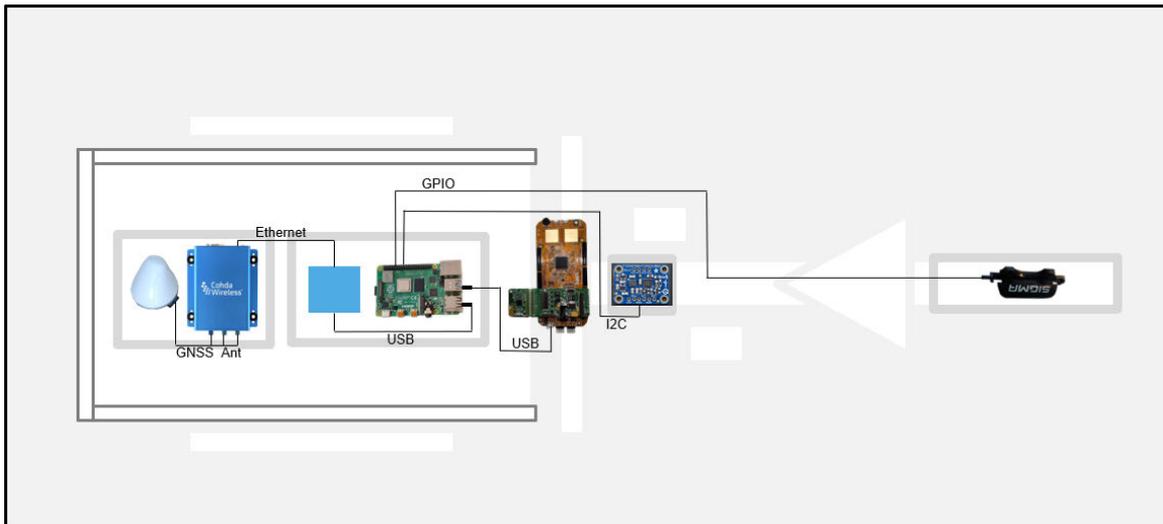


Abbildung 6.1.: Hardwareaufbau am Pedelec

6.1.2. LSA Hardwareaufbau

Die Abbildung 6.2 veranschaulicht den Hardwareaufbau der Lichtsignaleinheit. Diese besteht lediglich aus den zwei Komponenten On-Board-Unit und UWB-Board. Erstere ist als RSU im Einsatz und wird softwareseitig als solche konfiguriert. Über einen Modell-Akkumulator wird die Box mit 11,2 V versorgt. Durch den Autostart läuft die ETSI-V2X Applikation direkt nach dem Einschalten und sendet unter anderem die MAPEM Informationen an die OBU des Pedelecs, sobald dieses in Reichweite ist. Durch einen Laptop über USB wird das Ranger4 Board konfiguriert, gestartet und mit Power versorgt. Nach der Konfigurierung ist das als Anker genutzte UWB Board theoretische mit 5 V betreibbar und benötigt keinen Anschluss an einen Laptop. Der prototypische Hardwareaufbau wird auf dem Referenzpunkt der Kreuzung platziert und erfüllt die notwendigen Funktionen.

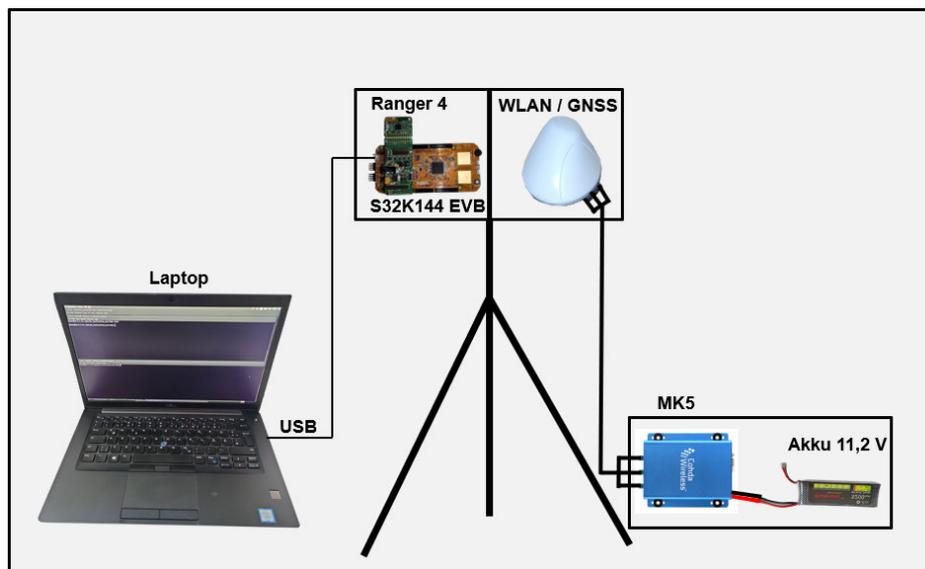


Abbildung 6.2.: Hardwareaufbau der Lichtsignalanlage

6.2. Softwareaufbau

In diesem Abschnitt werden die Softwaremodule beschrieben und die wesentlichen Funktionen aufgezeigt, die sie erfüllen. Der Hauptteil der entwickelten Software ist in Python verfasst. Die in C geschriebene ETSI-Applikation ist im Vorfeld durch Teamarbeit entstanden. Änderungen an der Konfiguration waren hier lediglich notwendig, um den Aufbau der Demokreuzung zu erstellen.

6.2.1. Übersicht

Die Abbildung 6.3 gibt einen Überblick vom Softwareaufbau. Es ist ersichtlich, dass sich die gesamte Architektur in drei Hauptteile untergliedern lässt. Diese sind Sensorik, Verarbeitung und Aktuatorik. Bis auf die ETSI-Applikationen der OBU und RSU, welche auf den MK5 Boxen laufen, läuft die Software auf dem Mikrocontroller des Pedelecs. Um die Software so modular wie möglich zu gestalten, ist jede im Folgenden beschriebene Softwarekomponente über das Netzwerkprotokoll MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) in der Lage, die jeweiligen spezifischen Daten zu senden und empfangen. Der Raspberry Pi dient als MQTT-Broker. Die Sensoren sind in der Regel sogenannte „Publisher“ (Herausgeber) und die Aktuatoren „Subscriber“ (Abonnenten, Bezieher) und können dementsprechend ein Thema abonnieren oder etwas unter einem Thema veröffentlichen. Die verarbeitenden Module sind sowohl Abonnent, als auch Herausgeber von Informationen.

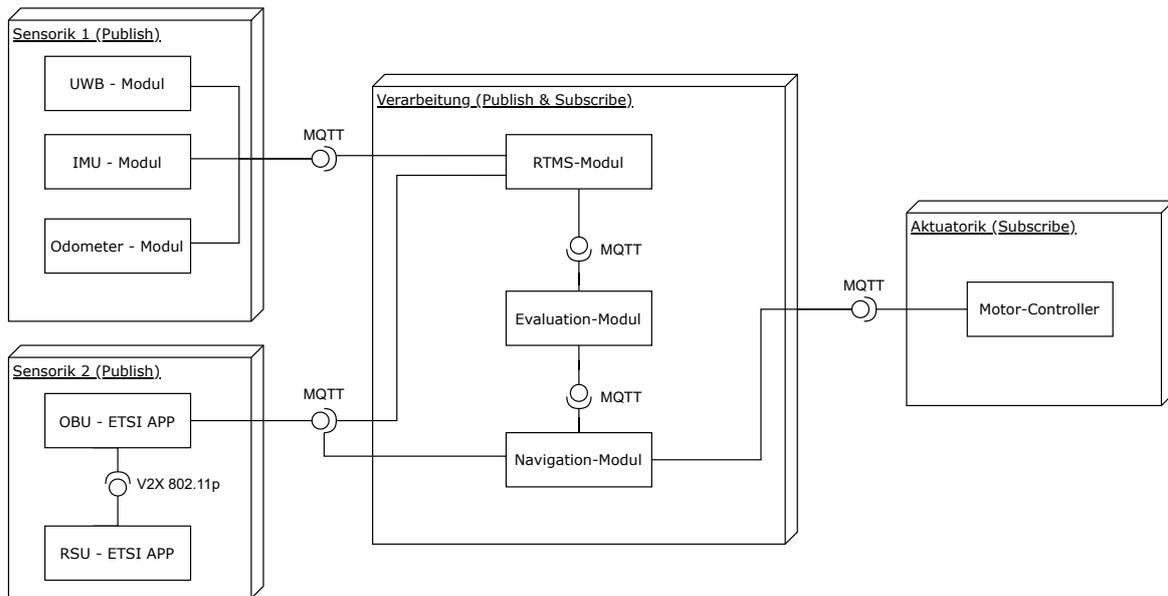


Abbildung 6.3.: Übersicht über die Software Module

• Sensorik

- *UWB-Modul:* Die Software für das Ultrabreitband-Board nimmt die Konfiguration und das Aktivieren der S32K144-Software und das Auslesen über die serielle Schnittstelle vor. Über MQTT werden die Daten an das RTMS-Modul gesendet.
- *UWB-Anker-Modul:* Das Anker-Modul nimmt die Initialisierung des UWB-Boards an der LSA vor und startet die Ranging-Sequenz.
- *IMU-Modul:* Die Software liest die ADC-Werte der Inertialen Messeinheit und führt eine Kalibrierungsroutine durch. Die Werte werden richtig formatiert an das rtms-Modul weitergeleitet.
- *Odometer-Modul:* Dieses Modul misst die über das Hinterrad ermittelte Geschwindigkeit des Pedelecs und veröffentlicht die Information.

• Verarbeitung

- *RTMS-Modul:* Die Software in diesem Modul sorgt für die Synchronisierung der Sensordaten. Gleichzeitig dient es als Start-Skript für die Messungen. Alle Sensordaten werden in Logfiles und CSV-Dateien abgespeichert. Zur Weiterverarbeitung findet zudem eine Vorbereitung und Filterung statt.

- *Evaluations-Modul*: Dieses Modul ist ein Abonnent der Daten des RTMS-Moduls. Die für eine Positionsbestimmung notwendigen Daten werden hier weiterverarbeitet und eine Position ermittelt.
- *Navigations-Modul*: Mit der aktuellen Position als Eingabewert, errechnet die Software mit Hilfe der V2X-MAPEM Daten den nächsten anzusteuern den Punkt im 2D-Koordinatensystem der Kreuzung. Als Ausgabe wird ein Fehler-Steuerwinkel veröffentlicht.

- **Aktuatorik**

- *Motor-Controller*: Der Hauptteil des Motorkontrollmoduls wurde nicht im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelt, findet aber zur Steuerung des Pedelecs Anwendung für die Demo. Servomotor und Elektromotor können über die Software bedient werden. Als Eingabeparameter ist lediglich der anzusteuern Winkel notwendig.

6.2.2. Sensormodule

Im Folgenden werden die Sensormodule genauer beschrieben. Zu jedem Modul wird ein Blockschaltbild gezeigt, das die Eingangs- und Ausgangsparameter aufzeigen soll. Zudem wird das Topic angegeben unter welchem die Daten über MQTT an die nächste Instanz weitergeleitet werden. Die Daten werden bei allen Sensormodulen im JSON-Format übertragen. Jedes Sensormodul sendet zudem einen Zeitstempel zu dem die Daten erfasst wurden.

UWB-Modul

Das UWB-Modul empfängt über die serielle Schnittstelle die Daten des UWB-Boards und leitet diese unter dem Topic „*sensor/uwb/distance*“ an den Broker weiter. Bevor der Ranging-Prozess beginnt, nimmt das Modul die Konfigurierung des Initiators vor. Im Wesentlichen werden die im Abschnitt 3.2.4 gezeigten Werte übertragen. Das Modul liest stetig die serielle

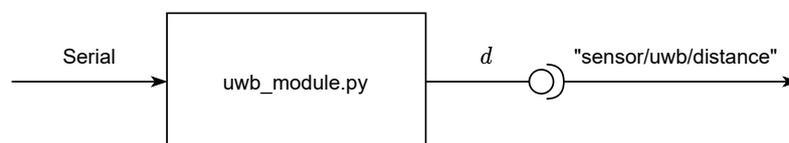


Abbildung 6.4.: Blockschaltbild vom UWB-Modul

USB-Schnittstelle aus und bekommt einen hexadezimalen Datenstrom mit der Distanz zu den am Ranging beteiligten Ankern als zu dekodierenden Inhalt.

IMU-Modul

Das IMU-Modul ist für das Aufnehmen und Verteilen der Daten von Beschleunigungssensor, Magnetometer und Gyroskop zuständig. Vor Beginn der Messungen werden zudem die Werte kalibriert. Dafür nimmt eine Routine eine Zeit lang Werte auf, welche gemittelt werden. Der daraus ermittelte Offset im Ruhezustand wird von den Rohdaten abgezogen. Unter dem Topic „*sensor/imu/data*“ werden die Daten in einem JSON-String veröffentlicht. Die Abbildung 6.5 zeigt die Schnittstellen und verarbeiteten Parameter.

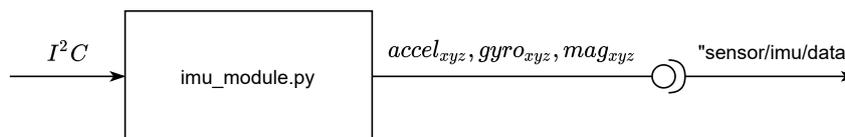


Abbildung 6.5.: Blockschaltbild vom IMU-Modul

Odometer-Modul

Dieses Modul ist für die Messung von Geschwindigkeit und Distanz verantwortlich. Über das Topic „*sensor/odometer*“ werden die Daten übermittelt. Die Abbildung 6.6 veranschaulicht die Schnittstellen und übertragenen Daten.

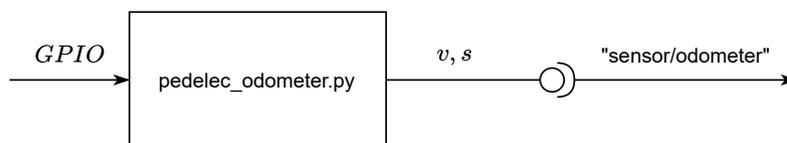


Abbildung 6.6.: Blockschaltbild vom Odometer-Modul

6.2.3. RTMS-Modul

Die Sensordaten kommen im Real-Time-Measurement-Modul (RTMS-Modul) zusammen. Hier werden die CSV-Dateien als Backup erzeugt und für jeden Testlauf in einem neuen Ordner abgelegt. Damit die Daten zur Verarbeitung bereitstehen, werden sie zudem vorbereitet. An dieser Stelle findet eine Nachverarbeitung der UWB-Distanzwerte statt. Der Bereich 0 m bis 100 m wurde als Randbedingung festgelegt. Kommt es zur Verletzung dieser Grenzen, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass es sich um eine Distanzmessung unter NLOS-Bedingung

handelt. In dem Fall wird der letzte plausible Distanzwert beibehalten. Die Gyroskop- und Geschwindigkeitswerte werden zudem integriert, um auf den Gierwinkel bzw. die zurückgelegte Distanz zu kommen. Unter dem Topic "rtms/data", werden die Daten im JSON-String-Format weitergeleitet. Die Abbildung 6.7 veranschaulicht die Schnittstelle und Ein- und Ausgabeparameter des Moduls.

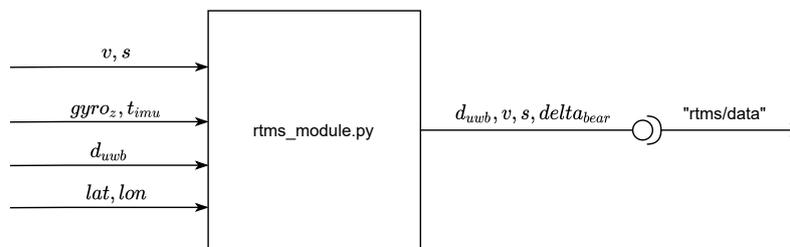


Abbildung 6.7.: Blockschaltbild des RTMS-Moduls

6.2.4. Evaluation-Modul

Die Aufgabe des Moduls ist es, die vorverarbeiteten Daten für eine Positionsbestimmung zu verwenden. Die Positionsbestimmungsmethoden sind in diesem Softwareabschnitt implementiert. Die notwendigen Daten dafür werden vom RTMS-Modul übermittelt. Aus der Änderung des Gierwinkels vom Pedelec wird der aktuelle Richtungswinkel bestimmt. Daraus findet die Berechnung des AoA statt. Mit letzterem und der Distanz aus der UWB-Messung, wird die Position des Pedelecs im Koordinatensystem der Kreuzung bestimmt. In der Abbildung 6.8 wird das MQTT-Topic neben den Ein- und Ausgabeparametern aufgezeigt.

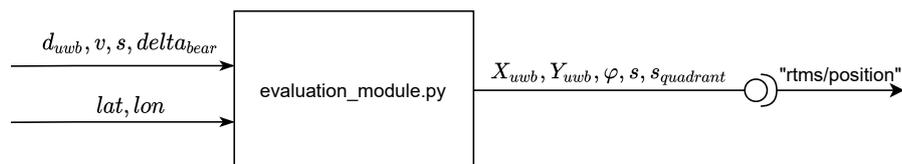


Abbildung 6.8.: Blockschaltbild des Evaluation-Moduls

6.2.5. Navigation-Modul

Das Modul ist für das Auswerten der V2X-MAP Informationen zuständig und ermöglicht aus den Positionsdaten des Evaluation-Moduls und mit Hilfe der Koordinaten der MAPEM eine automatische Steuerkorrektur des Pedelecs. Es wird der nächstgelegene Koordinatenpunkt

der Fahrspur angefahren, auf der das Lastenfahrrad fährt. Ist eine bestimmte Distanz zum Koordinatenpunkt unterschritten, wird der nächste Punkt angesteuert.



Abbildung 6.9.: Blockschaltbild des Navigations-Moduls

6.2.6. ETSI-Applikation

Die ETSI-Applikationen sorgen für das Verteilen der V2X-Informationen. Die als RSU konfigurierte C-ITS Station der LSA ist für das Aussenden der MAPEM und damit der Koordinaten der Fahrspuren und generellen Aufbau der Kreuzung zuständig. Mit diesen Informationen soll das Pedelec autonom navigieren können. Die als OBU konfigurierte mobile C-ITS Station auf dem Pedelec nimmt unter anderem die eigenen GPS-Positionsdaten auf. Im Sekunden-takt werden diese über MQTT an den Broker gesendet. Die MAPEM der RSU empfängt die OBU und leitet sie ebenfalls über MQTT weiter.

6.2.7. Messablauf

Die Abbildung 6.10 veranschaulicht die bei der Demo beteiligten Komponenten und zeigt auf, welche Daten die Sensoren und Aktoren verarbeiten und bereitstellen. Zudem wird verdeutlicht, zwischen welchen Instanzen die Daten verschickt werden. Zu den Sensoren zählt das UWB-Board und die IMU. Die V2X Kommunikation läuft zwischen der OBU und RSU. Es ist lediglich die MAPEM im Rahmen dieser Arbeit von Belang.

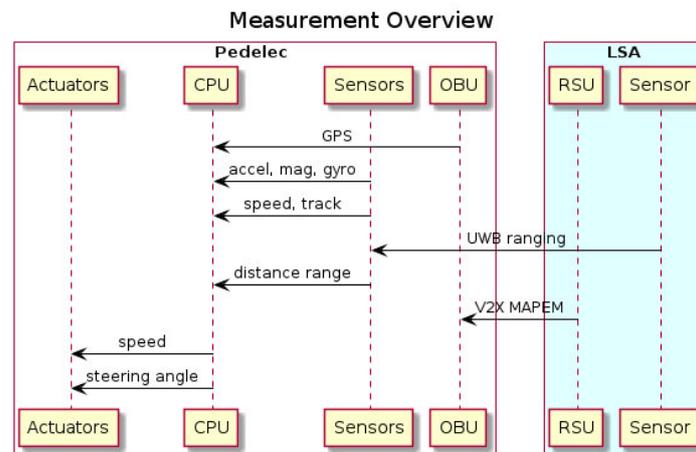


Abbildung 6.10.: Überblick über den Ablauf der Messdatenerfassung; eigene Darstellung;

6.3. Integrationstest

Die Integrationstests fanden auf einem Gelände bei NXP in Hamburg statt. Ein Parkplatz, der von einem hohen U-förmigen Gebäude eingegrenzt ist, dient hierbei als Testkreuzung. Es wurden GPS-Koordinaten ermittelt und eingezeichnet. Die Abbildung 6.11 zeigt die Draufsicht des Testfeldes. Vor allem wegen der potentiellen Satellitensicht-Abdeckung durch das Gebäude eignet sich diese Gegend besonders gut zum Vergleichen der globalen Lokalisierungen mit GPS und lokalen Verfahren mit UWB. Erkennbar ist die mittig platzierte LSA der Kreuzung, auf der sich die UWB Sensorik befindet. Der Test wurde durch das einmalige Abfahren des Parcours im Uhrzeigersinn so einfach und reproduzierbar wie möglich gestaltet. Dafür wurde das Pedelec auf der vorbestimmten Startposition in Richtung der ersten anzusteuernden Fahrspurkoordinate platziert. Die Sensormodule werden zu Beginn der Messfahrt gestartet. Nach einer Initialisierungsphase, bei der sich das Pedelec mindesten drei Minuten in Ruhe befand, wurde der Parcours im Schrittempo abgefahren. Die Aufnahme und Auswertung der Messdaten wird mit dem Start des RTMS-Moduls initiiert. Während der Fahrt konnte die aktuelle Pedelec-Position über ein Plot-Skript angezeigt werden.



Abbildung 6.11.: Die gefahrene Teststrecke wird gezeigt. Der Testaufbau befindet sich auf dem Gelände bei NXP in Hamburg. Die Fahrrichtung verläuft in Richtung der Pfeile. Start und Stopp befinden sich im rechten Bildbereich.

6.4. Ergebnisse

An dieser Stelle werden die Messergebnisse diskutiert. Es fanden Messfahrten unter verschiedenen Bedingungen statt. Zum Teil befanden sich Kraftfahrzeuge auf dem Testfeld. Dadurch gab es zwischenzeitliche Sichtunterbrechung, die Auswirkungen auf die Distanzermittlung hatten. Das Ziel der Testfahrten war es, einen Vergleich zwischen der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Positionsbestimmungsmethode und über GPS ermittelte Positionen herzustellen. Zudem sollte die Anwendung eines erweiterten Kalman Filters geprüft werden. Dafür wurde versucht möglichst adäquate LOS-Bedingungen zu schaffen. Ein weiteres Ziel war das Überprüfen der autonomen Lenk- und Fahrfunktion.

6.4.1. Vergleich zwischen GPS und UWB-Positionsbestimmung

Die Ergebnisse aus der Abbildung 6.13 zeigen einen Vergleich zwischen der entwickelten Positionsbestimmungsmethode mit UWB (gelb) und GPS (rot). Der gefahrene Parcours ist blau markiert. Der Versuch zeigt, wie sich die Sichtabdeckung der Satelliten auf die GPS-Positionsbestimmung auswirkten. Es liegt nahe, dass die Ursache dafür mit den im Abschnitt 2.2.1 erläuterten Effekten zu tun hat. Eine globale Positionsbestimmungsmethode bietet sich in diesem Umfeld nicht an. Selbst nach längerem Warten konnte nicht die korrekte Start- und Endposition erkannt werden. Die auf das lokale Koordinatensystem bezogene Positionsbestimmungsmethode mit UWB liefert hier bessere Ergebnisse. Die Abweichungen im Falle von GPS liegen bei ca. 10m als maximalen Wert. Die UWB-Positionsbestimmungsmethode zeigt hier eine maximale Abweichung von ca. 5m. Letztere sind vor allem durch Sichtunterbrechungen (NLOS) entstanden.

Aufgrund der hohen Ungenauigkeit, wurden den GPS Daten eine geringere Aufmerksamkeit zuteil. Eine detailliertere Auswertung wurde bei den folgenden Messungen unternommen.

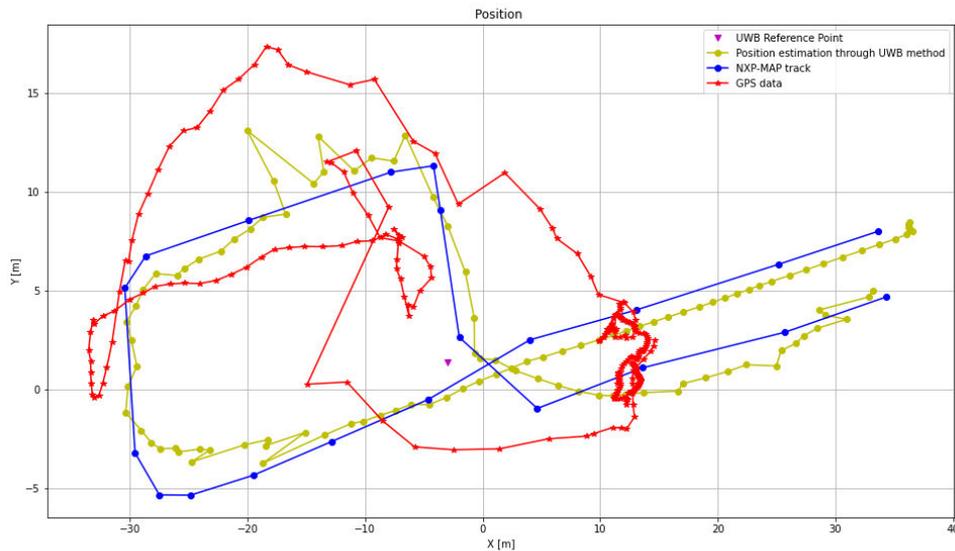


Abbildung 6.12.: Messergebnisse eines Vorversuchs; Zu sehen sind in rot die GPS Werte, in blau der zu fahrende Parcours und in gelb die Messergebnisse der Positionsbestimmungsmethode;

6.4.2. Messergebnisse mit NLOS-Bedingungen

Eine weitere Messfahrt, bei der Nichtsichtverbindungen Auswirkungen auf die Genauigkeit der Lokalisierung hatten, verdeutlichen die in der Abbildung 6.13 gezeigten Ergebnisse. In gelb sind die UWB-Positionsdaten abzulesen. Es ist der abgefahrte Parcours in blauer Farbe erkennbar. In grüner Farbe ist eine Kombination aus UWB-Positionsdaten und einer inertialen Navigation mit Hilfe eines erweiterten Kalman Filters zu erkennen. Es wird deutlich, dass an Stellen, an denen eine Nichtsichtverbindung die UWB-Lokalisierungsergebnisse verschlechtert, das erweiterte Kalman Filter diese gut kompensieren kann. Allerdings reagiert letzterer stärker auf Veränderungen des Gierwinkels. In dieser Hinsicht zeigt die UWB-Lokalisierung mit der festen Referenz einen Vorteil.

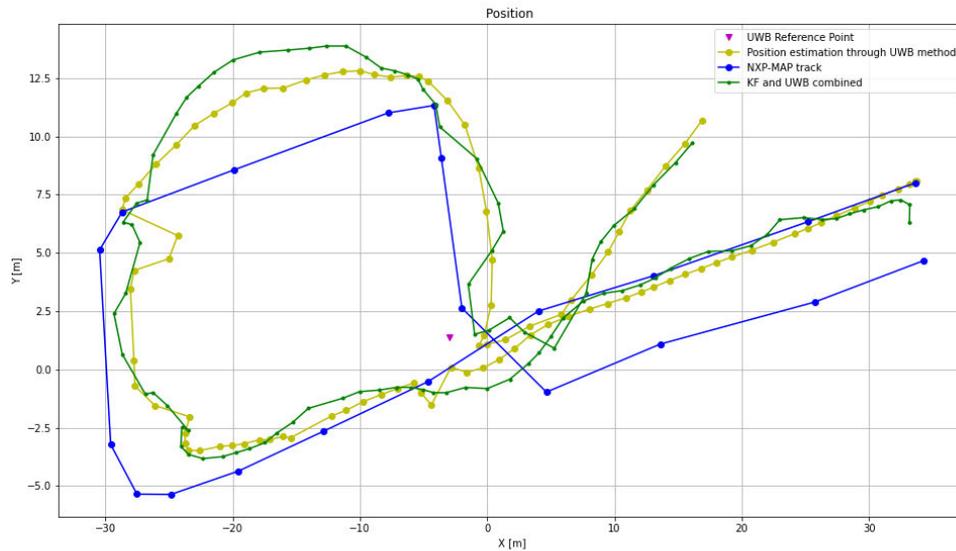


Abbildung 6.13.: Das Diagramm zeigt Messergebnisse mit vereinzelt NLOS-Bedingungen.

Auswertung

Um die Positionsabweichungen auswerten zu können, wurde nach dem Prinzip der linearen Regression aus dem Abschnitt 2.7.2 eine Ausgleichsgerade bestimmt. Zu dieser wurden dann die Abstände ermittelt. Als Ausgleichsgerade bieten sich die jeweiligen Fahrspuren an. Für jede Fahrspur wurde mit Hilfe der Fahrspurkoordinaten eine Gerade gebildet, die die jeweilige Fahrspur abbildet. Zwei weitere Geraden sind für die Übergänge zwischen den Fahrspuren vorgesehen. Eine Ausnahme stellt zudem die Fahrspur mit der ID 30 dar. Diese wurde in drei weitere Abschnitte unterteilt, da sie nicht wie die anderen Fahrspuren bereits einen linearen Charakter hat. Mit der Formel 6.1 lassen sich die Abstände bestimmen [39].

$$v_i = y_i - (a \cdot x_i + b) \quad (6.1)$$

Die Abstandsvektoren v_i enthalten die Positionsabweichung in y-Richtung. y_i stellt die y-Werte mit den Parametern a (Steigung) und b (Y-Achsenabschnitt) lässt sich die jeweilige Gerade beschreiben. In der Tabelle 6.1 sind die minimalen, maximalen und durchschnittlichen Positionsabweichungen bezogen auf die Fahrspur aufgelistet.

Tabelle 6.1.: Positionsabweichungen eines Testlaufs zur Überprüfung der UWB-Lokalisierungsmethode.

Bezeichnung	Abweichungen								
Fahrspur ID / Transition	10	10/21	21	30			30/11	11	Σ
Abschnitt	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
Minimum [m]	0,03	0,02	0,28	2,17	0,37	2,21	0,48	3,04	0,02
Maximum [m]	0,63	1,09	1,45	6,32	3,11	2,96	0,86	9,27	9,27
Durchschnitt [m]	0,34	0,78	0,74	4,07	2,08	2,64	0,61	6,08	2,17

Die Nichtsichtbedingungen haben zur Folge, dass die Positionsabweichung im Abschnitt 4 eine maximale Differenz von 6,32 m hat. Im Großen und Ganzen beträgt die maximale Abweichung jedoch weniger als 3 m. Die Abweichungen im letzten Abschnitt lassen sich vermutlich auf einen systematischen Fehler zurückführen.

Eine Verteilung der Positionsabweichungen zeigt auch die Histogrammdarstellung in der Abbildung 6.14. Ersichtlich wird, dass die Mehrheit der Abweichungen unterhalb von einem Meter liegt. Es handelt sich bei den verhältnismäßig hohen Abweichungen um vereinzelte Ausreißer.

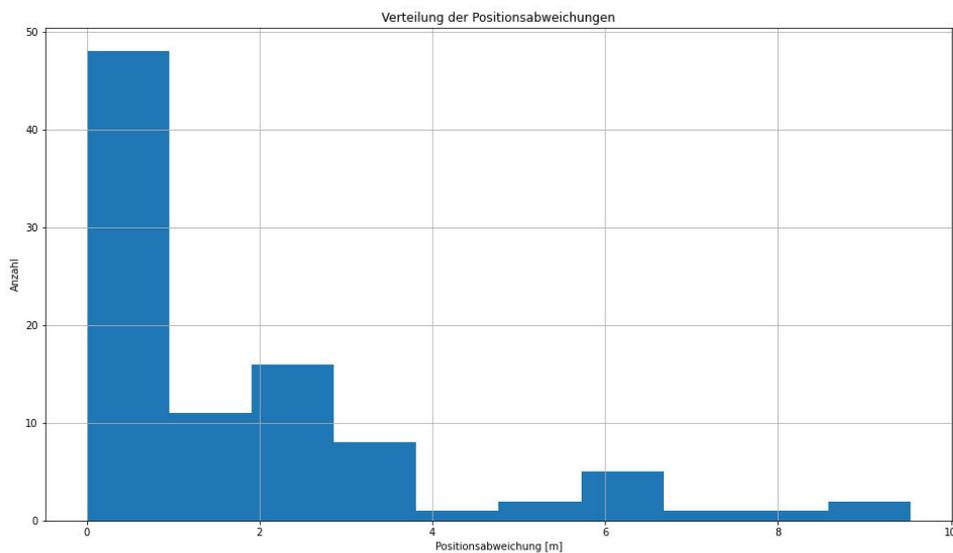


Abbildung 6.14.: Das Histogramm zeigt die Verteilung der Positionsabweichungen einer Messfahrt mit vereinzelt auftretenden NLOS-Bedingungen.

6.4.3. Messergebnisse mit LOS-Bedingungen

Die Messungen der hier beschriebenen Testfahrt sind bei optimalen Sichtbedingungen entstanden. Dies spiegelt sich auch in der Abbildung 6.15 wider. Die erweiterte Kalman Filter Implementierung zeigt auch hier wieder eine hohe Empfindlichkeit bei Gierwinkeländerungen. Vereinzelt zeigt diese eine höhere Genauigkeit als es bei der UWB-Lokalisierung der Fall ist.

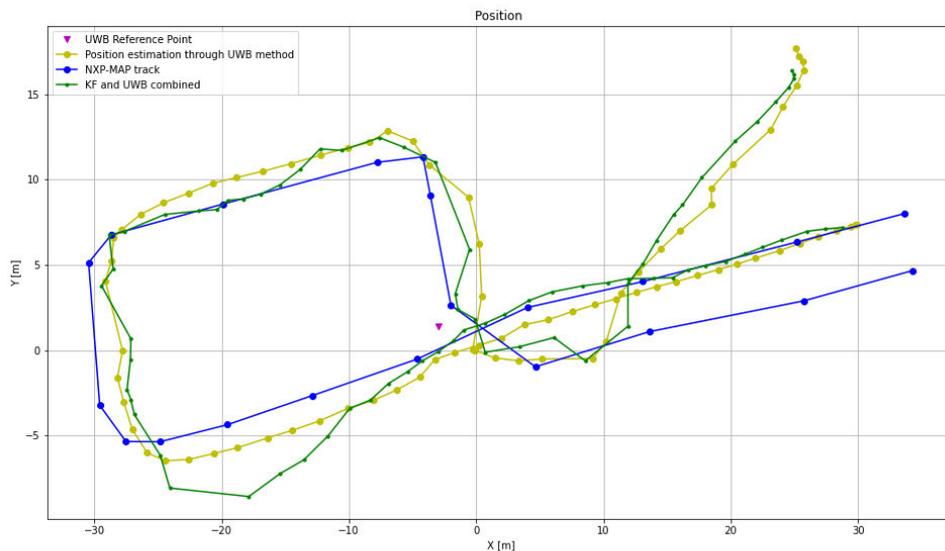


Abbildung 6.15.: Messergebnisse eines Versuchs unter LOS-Bedingungen.

Auswertung

Die Auswertung der Abweichung mit der zuvor beschriebenen Methode über Ausgleichsgeraden, zeigt die in der Tabelle 6.2 aufgelisteten Werte. Die durchschnittliche Abweichung über alle Messungen und Abschnitte liegt bei 2,14 m bei der UWB-Lokalisierung. Die erweiterte Kalman-Filter Implementierung zeigt auch hier wieder an vereinzelt Stellen eine Verbesserung der Genauigkeit. Jedoch sind auch abdriftende Messwerte zu erkennen. Dies liegt möglicherweise darin begründet, dass das Bewegungsmodell des Kalman Filters stark an die Änderung der Gierrate gekoppelt ist und mit dem bekannten Prinzip *Dead Reckoning* im Rahmen dieser Arbeit funktioniert.

Tabelle 6.2.: Positionsabweichungen eines Testlaufs

Bezeichnung	Abweichungen								
	10	10/21	21	30			30/11	11	Σ
Fahrspur ID / Transition	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
Minimum [m]	0,02	0,51	0,59	1,21	0,02	0,37	1,21	0,29	0,02
Maximum [m]	0,93	1,09	1,79	2,13	1,87	3,12	1,64	14,70	14,70
Durchschnitt [m]	0,42	0,78	1,44	1,79	1,12	2,25	1,49	7,79	2,14

Die Verteilung der Positionsabweichungen in der Abbildung 6.16 zeigt auch hier, dass die Mehrheit der Abweichungen sich im Bereich unter 2 Metern befindet. Die vereinzelt Ausreißer sind auch hier erkennbar. Das bestärkt die Vermutung eines systematischen Fehlers. Aus Zeitgründen konnte diesem Fehler nicht weiter nachgegangen werden.

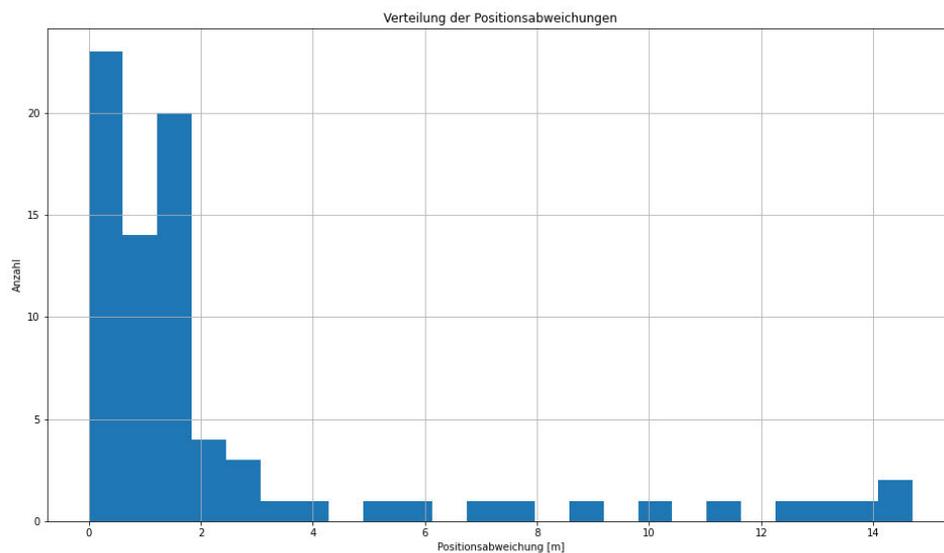


Abbildung 6.16.: Verteilung der Positionsabweichungen bei vorwiegend guten LOS-Bedingungen;

6.4.4. Simulation einer Navigation

Der Integrationstest der autonomen Steuerfunktion sollte nach erprobter UWB-Positionsbestimmungsmethode stattfinden. Die Frage einer Eignung für eine autonome

Fahrfunktion sollte bei diesem Test unabhängig der vorherigen Ergebnisse geprüft werden. Die Abbildungen 6.17 und 6.18 verdeutlichen das Prinzip der autonomen Steuerung des Pedelecs. Aus den V2X MAPEM-Daten werden die Koordinaten der Fahrspuren entnommen und der nächste Punkt zur Position des Pedelecs ermittelt. Ein Fehlerwinkel wird bestimmt, der die Differenz zwischen der aktuellen Fahrtrichtung und des anzusteuern Kurses ausgleichen soll. Dieser Winkel wird dem P-Regler der Servomotorsteuerung übergeben.

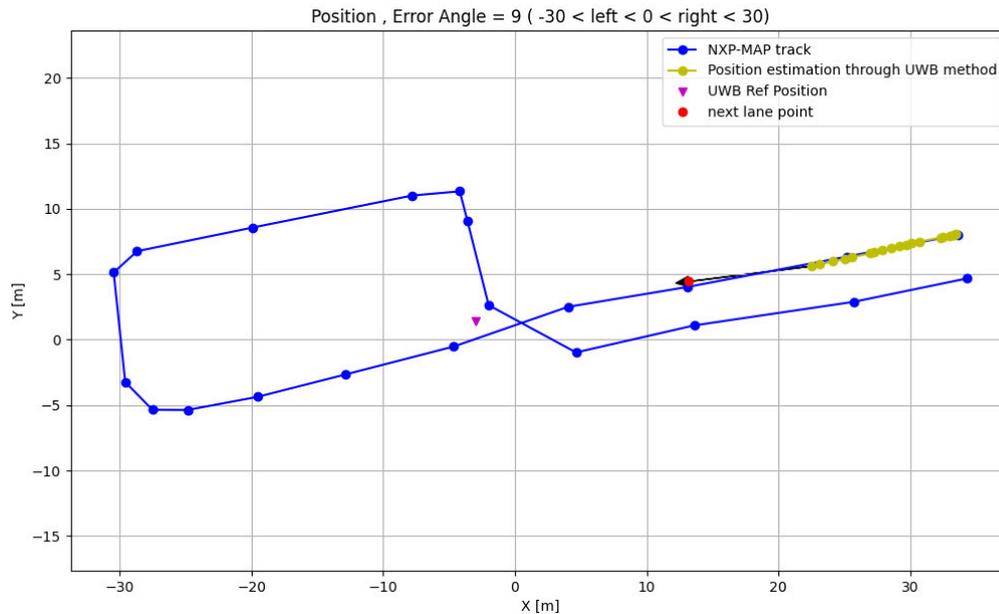


Abbildung 6.17.: Simulationsergebnisse zum Testen der autonomen Steuerfunktion unter Einsatz der entwickelten UWB-Positionsbestimmungsmethode, Teil 1.

Aufgrund von zeitlicher Knappheit konnte die autonome Fahrfunktion im realen Testumfeld nicht vollständig erprobt werden.

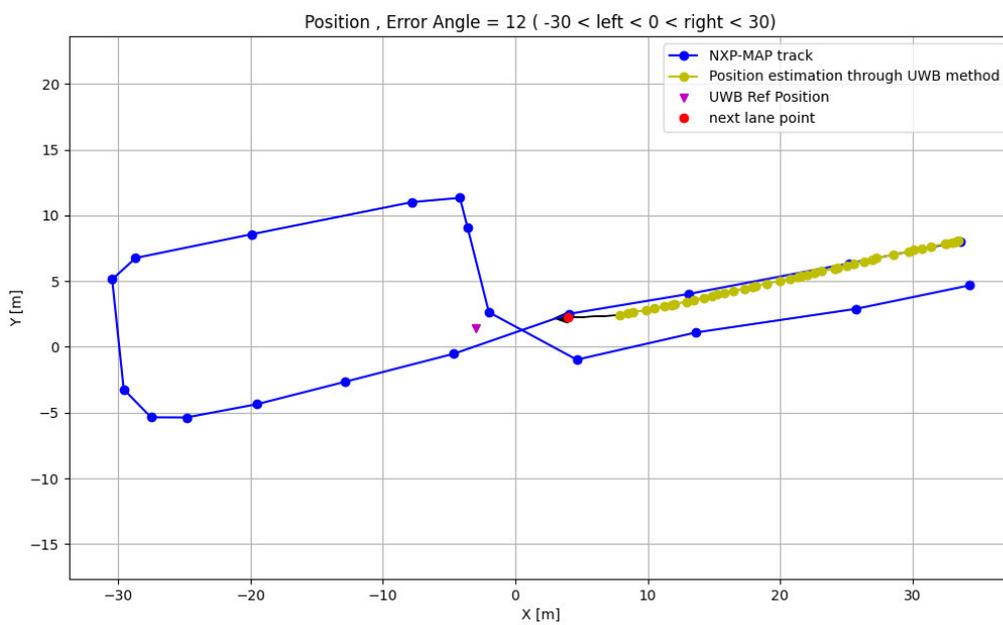


Abbildung 6.18.: Simulationsergebnisse zum Testen der autonomen Steuerfunktion unter Einsatz der entwickelten UWB-Positionsbestimmungsmethode, Teil 2.

7. Bewertung und Ausblick

Zum Abschluss wird in diesem Kapitel die Ausarbeitung und Umsetzung der gestellten Aufgabe der Arbeit zusammengefasst. Zudem findet eine Bewertung des Konzeptes und der Ergebnisse statt. Mit einem Ausblick werden mögliche Anpassungen und Verbesserungsvorschläge in Aussicht gestellt.

7.1. Zusammenfassung

Der wesentliche Kern dieser Arbeit, war die Entwicklung einer Positionsbestimmungsmethode im Bereich des Straßenverkehrs. Anhand eines prototypischen Aufbaus mit einer Lichtsignalanlage und einem elektrischen, vernetzten Lastenfahrrad wurde diese Methode in ein Gesamtsystem integriert und untersucht. Eine im Theorieteil zusammengefasste Recherche hat den Leser im Vorfeld auf die möglichen Technologien und Methoden zur Lokalisierung und Vernetzung vorbereitet. Eine Vielfalt an Möglichkeiten wurde ersichtlich. Für die Spezialisierung auf eine Technologie, hat die Analyse der Rahmenbedingungen eine Konkretisierung für ein Konzept ergeben.

In dieser Arbeit sollte eine Verbindung aus mehreren Sensorelementen für die Lösung des Genauigkeitsproblems angewandt werden. Mit Hilfe von GNSS, einer IMU und einer auf Ultra-Wide-Band basierenden Lokalisierungsmethode wurde das Konzept entwickelt. Es wurde zudem der Einsatz eines Kalman Filters geprüft.

Die Umsetzung des Konzeptes fand auf einem Parkplatz bei NXP in Hamburg statt. Dort wurde eine Testkreuzung aufgebaut. Mit dieser sollte eine Realanwendung angenähert werden, um die Positionsbestimmungsmethode zu erproben. Das elektrische Lastenfahrrad sollte dabei eine vorgegebene Strecke abfahren. Diese lässt sich auch anhand der Fahrspuren beschreiben und angeben. Zunächst wurden bemannte Testfahrten zur Messdatenerfassung aufgenommen bei denen der Fahrer die Kontrolle über das Fahrrad hatte. Erfasst wurden im Wesentlichen Daten wie GNSS Koordinaten, Geschwindigkeitsdaten, Gierwinkel- und Distanzdaten. Mit den Messdaten wurde die Positionsbestimmungsmethode entwickelt und validiert.

Als abschließendes Ziel sollte eine autonome Fahrt des Pedelecs durch den vorgegebenen Parcours mit Hilfe der entwickelten Lokalisierungsmethode ausgeführt werden. Dies konnte

abschließend aus Zeitgründen nicht vollständig umgesetzt werden. Eine Simulation soll die Umsetzbarkeit stattdessen verdeutlichen.

7.2. Bewertung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass es Vor- und Nachteile bei den Technologien gibt. Durch eine Kombination können diese zu einem Konzept zusammengefügt werden, bei dem sich die Nachteile stückweise kompensieren lassen. GNSS hat den klaren Vorteil der globalen Verfügbarkeit. Die Grenzen liegen eindeutig bei der Genauigkeit, welche vor allem durch die Ungenauigkeit der Zeiterfassung im Empfänger, aber auch durch ein gestörtes Umfeld entstehen.

Lokale Ortungsmethoden wie die in dieser Arbeit vorgestellte Methode über Distanzmessungen mit Ultrabreitband und Ermittlung des AoA können zu einer Verbesserung beitragen. Da das in dieser Arbeit verwendete UWB-Board keine eingebaute Ankunfts winkelermittlung hat, musste zusätzlich eine IMU zur Erfassung des Gierwinkels und Änderung der Fahrtrichtung des Pedelecs benutzt werden. Insofern ist die Positionsbestimmungsmethode in dieser Arbeit von den Grenzen der IMU abhängig. Auch ist eine Initialisierung vor Beginn der Fahrt notwendig. Fahrtrichtung und Standort des Pedelecs sind initial über GNSS zu ermitteln. Da auf dem Testfeld stetig mit ungenügender Empfangsqualität zu rechnen war, wurden Richtung und Startpunkt manuell eingetragen. Eine Richtungsbestimmung über das Magnetometer hat sich ebenfalls als nicht genau genug herausgestellt.

Neben der Distanzabweichung durch die UWB Distanzmessung ist ein Fehler der Gierratenerfassung zu beachten gewesen. Zusammen mit den Geschwindigkeitsdaten wurde über eine indirekte AoA-Erfassung eine Positionsbestimmung ermöglicht. Bei einer Abweichung des AoA von $\pm 1^\circ$ auf 100 m hat sich bei den festgelegten Anforderungen mit 1,69 m eine nicht mehr tolerierbare Positionsabweichung während der Analyse herauskristallisiert. Daher müsste eine Verringerung der Distanz zwischen den Ankerpunkten eingeplant werden. Die Ergebnisse des Integrationstests zeigen eine durchschnittliche Positionsabweichung von 2,14 m bei guten Sichtbedingungen zwischen den UWB Geräten. Bei Nichtsichtbedingungen ist die durchschnittliche Abweichung mit 2,17 m nur geringfügig schlechter gewesen. Hier wurde gezeigt, dass eine Kombination der Sensorik mit einem erweiterten Kalman-Filter die Resultate der NLOS-Messungen beim UWB-Ranging kompensieren kann. Die Lösung über einen erweiterten Kalman-Filter liefern jedoch nicht immer bessere Ergebnisse, wie die Diagramme gezeigt haben.

Die autonome Testfahrt, bei der die Steuerung des Pedelecs über den Computer anhand der Positionsabweichungen geregelt werden sollte, konnte nicht vollständig stattfinden. Am Ende stellte sich der zeitliche Aufwand des Integrationstests für diesen Teilaspekt als zu hoch heraus. Es wurde über eine Simulation im Auswertungsteil gezeigt, dass dies jedoch möglich ist.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die vorgestellte Positionsbestimmungsmethode zur Verbesserung der Genauigkeit beitragen kann. Es gibt weitere Ansätze, die in dieser Arbeit nicht behandelt wurden, aber Aussicht auf eine Erhöhung der Genauigkeit haben.

7.3. Ausblick

Im zeitlich begrenzten Rahmen dieser Arbeit konnten nicht alle Möglichkeiten erprobt werden. Es wurde sich auf die Anwendung eines UWB-Boards ohne AoA-Funktion fokussiert. Auch wurde letztendlich ein Initiator und ein Responder für das Ranging benutzt. Im Vorfeld hat ein Versuch mit einem zusätzlichen Responder auf einer zweiten LSA stattgefunden. Dies wurde jedoch verworfen, da zunächst keine befriedigenden Ergebnisse entstanden sind. Allerdings könnte dies zur Verbesserung bei Nichtsichtverbindungen führen, wenn einer der Anker abgedeckt ist. Somit trüge dies zu einer höheren Verfügbarkeit von Distanzdaten für die Ermittlung einer genauen Position bei. Mit dem erweiterten Kalman-Filter wurden UWB-Positionsdaten mit Geschwindigkeitsdaten und dem Gierwinkel kombiniert. Beim Verlassen einer Kreuzung und eines Bereichs mit hoher Satellitensichtabdeckung könnte ein Wechsel der UWB-Positionsdaten auf die GNSS-Positionsdaten stattfinden oder eine Kombination erfolgen.

Das Prinzip, aus einem Winkel und einer Distanz eine Position zu bestimmen, bedarf wenig Hardwareaufwand und würde sich somit für den Straßenverkehr eignen. Die Frage nach der Genauigkeit eines solchen Systems bei dem die Bestimmung des AoA über ein Antennenarray vollzogen wird, steht nach Abschluss der Arbeit im Raum. Weitere Arbeiten sollten sich mit dieser Frage beschäftigen. Die benutzten UWB-Boards hätten mit einem Abstand von weniger als $\lambda/2$ auf dem Lenker des Pedelecs platziert werden können, um so ein AoA-Verfahren zu ermöglichen. Allerdings hätte dies einen zusätzlichen Softwareentwicklungsaufwand bedeutet, der den zeitlichen Rahmen der Arbeit überstiegen hätte.

Mit Multilateration über UWB eine Positionsbestimmung zu etablieren würde vermutlich erhöhten Hardwareaufwand bedeuten, ließe sich aber in einem Testszenario mit beispielsweise vier am Rand platzierten UWB-Ankern und einem Initiator umsetzen. Ob sich diese Methode für den Straßenverkehr eignet, bleibt offen.

Neben Ultra Wide Band kann eine Positionsbestimmung über Bluetooth 5.1 ebenfalls in weiteren Arbeiten für den Gebrauch im Straßenverkehr erprobt werden. Aus genannten Gründen wurde diese Technologie hier nicht näher untersucht.

Für eine sichere autonome Fahrfunktion sollte grundsätzlich weitere Sensorik beteiligt sein, als dies im Rahmen dieser Arbeit der Fall war. Das fahrende Objekt sollte in gewisser Weise „sehen“ können.

Literaturverzeichnis

- [1] Abbildung von gnss messergebnissen auf einer testfahrt auf der tavf. Presentation from Leo Mustafa. Gemessen: 2021-02-25.
- [2] Adafruit precision nxp 9-dof breakout board - fxos8700 + fxa21002. <https://www.amazon.de/Adafruit-Precision-9-DOF-Breakout-Board/dp/B0716LNM7H>. aufgerufen: 2021-03-29.
- [3] Compass heading using magnetometers. https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/AN203_Compass_Heading_Using_Magnetometers.pdf. aufgerufen: 2021-03-29.
- [4] Datasheet fxa21002. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/FXAS21002.pdf>. aufgerufen: 2021-03-16.
- [5] Datasheet fxos8700. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/FXOS8700CQ.pdf>. aufgerufen: 2021-03-16.
- [6] Intelligent transport system (its); vulnerable road users (vru) awareness; part1: Use cases definition; release 2. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103300_103399/10330001/02.01.01_60/tr_10330001v020101p.pdf. aufgerufen: 2021-02-08.
- [7] Mk5 obu. <https://cohdawireless.com/solutions/hardware/mk5-obu/>. aufgerufen: 2021-03-29.
- [8] Mk5 obu cohda wireless. <https://cohdawireless.com/solutions/hardware/mk5-obu/>. aufgerufen: 2021-03-04.
- [9] Mk5 rsu. <https://cohdawireless.com/solutions/hardware/mk5-rsu/>. aufgerufen: 2021-03-29.
- [10] Mqtt website. <https://mqtt.org/>. aufgerufen: 2021-03-20.
- [11] Teststrecke für autonomes und vernetztes fahren. <https://tavf.hamburg/>. aufgerufen: 2021-03-03.

- [12] Understand moving average filter with python and matlab. https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/__32.html. aufgerufen: 2021-03-28.
- [13] Understand moving average filter with python and matlab. <https://www.gaussianwaves.com/2010/11/moving-average-filter-ma-filter-2/>. aufgerufen: 2021-03-28.
- [14] Whitepaper v2x-locate. https://cohdawireless.com/wp-content/uploads/2018/08/Whitepaper_V2X-Locate.pdf. aufgerufen: 2021-03-14.
- [15] Xyz cargo trike. <http://www.xyzcargo.com/de/raeder/>. aufgerufen: 2021-02-08.
- [16] IEEE standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments. *IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*, pages 1–51, 2010.
- [17] IEEE standard for low-rate wireless networks. *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, pages 1–709, 2016.
- [18] M. Bauer. *Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. Wichmann, 2011.
- [19] B. Ben-Moshe, E. Elkin, H. Levi, and A. Weissman. Improving accuracy of GNSS devices in urban canyons. 01 2011.
- [20] A. Born. *Algorithmen zur Positionsbestimmung sowie deren Genauigkeiten in drahtlosen Sensornetzwerken*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2011.
- [21] M. Cominelli, P. Patras, and F. Gringoli. Dead on arrival: An empirical study of the Bluetooth 5.1 positioning system. In *Proceedings of the 13th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization*, pages 13–20, 2019.
- [22] H.-U. Dehner. *Interferenzuntersuchungen für inkohärente Multiband-Ultra-Breitband (UWB)-Übertragung*. PhD thesis, Inst. für Nachrichtentechnik, 2012.
- [23] M. Eisenacher. *Optimierung von Ultra-Wideband-Signalen (UWB)*. PhD thesis.

- [24] ETSI. Intelligent transport systems (its); security; pre-standardization study on pseudonym change management. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103400_103499/103415/01.01.01_60/tr_103415v010101p.pdf. aufgerufen: 2021-03-29.
- [25] T. ETSI. Intelligent transport systems (its); vehicular communications; basic set of applications; facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services. *Tech. Rep. ETSI TS 103 301 V1.1.1 (2016-11)*, 2016.
- [26] T. Frey and M. Bossert. *Signal-und Systemtheorie*, volume 2. Springer, 2008.
- [27] J. Gonzalez, J. Blanco, C. Galindo, A. Ortiz-de Galisteo, J. Fernandez-Madrigal, F. Moreno, and J. Martinez. Combination of uwb and gps for indoor-outdoor vehicle localization. In *2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, pages 1–6. IEEE, 2007.
- [28] P. Groves. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*. 03 2013.
- [29] W. T. Higgins. A comparison of complementary and kalman filtering. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-11(3):321–325, 1975.
- [30] J.Casademont, A.Calveras, D. Quinones, M. Navarro, J. Arribas, and M. Catalan-Cid. Cooperative-intelligent transport systems for vulnerable road users safety. In *2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, pages 141–146, 2019.
- [31] D. H. Johnson and E. Dan. De dudgeon array signal processing, 1993.
- [32] D. Kreiser. Optimierung und erweiterung des ieee 802.15. 4a uwb-standards für den einatz in automatisierungssystemen. 2015.
- [33] E. Lertes. *Funkortung und Funknavigation*. Springer, 1995.
- [34] M. Malajner, P. Planinsic, and D. Gleich. Uwb ranging accuracy. In *2015 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, pages 61–64, 2015.
- [35] D. Neiryck, E. Luk, and M. McLaughlin. An alternative double-sided two-way ranging method. In *2016 13th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WP-NC)*, pages 1–4, 2016.
- [36] H. Nikookar and R. Prasad. *Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications*. Signals and Communication Technology. Springer Netherlands, 2008.
- [37] D. of Defence. Global positioning system standard positioning service performance standard, 2020. 5th edition.

- [38] B. O’Keefe. Finding location with time of arrival and time difference of arrival techniques. *ECE Senior Capstone Project*, 2017.
- [39] L. Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3*. 2016.
- [40] B. Parkinson and J. Spilker. *Global Positioning System: Theory and Applications*. Number Bd. 1 in *Ciencia militar y naval*. American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1996.
- [41] H. Qiu, M. Qiu, and R. Lu. Secure v2x communication network based on intelligent pki and edge computing. *IEEE Network*, 34(2):172–178, 2020.
- [42] K. Reif. *Automobilelektronik*, volume 2. Springer, 2007.
- [43] K. Reif. *Sensoren im Kraftfahrzeug*. Springer, 2010.
- [44] A. Sakai. Erweiterter kalman-filter in python. https://github.com/AtsushiSakai/PythonRobotics/blob/master/Localization/extended_kalman_filter/extended_kalman_filter.py. aufgerufen: 2021-03-29.
- [45] H. Song, S. S. Nam, and Y. Ko. Angle-of-arrival estimation in antenna arrays based on monopulse signal. In *2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 610–613, 2019.
- [46] O. Splieth. Abbildung prinzip triangulation. erstellt: 2021-02-25.
- [47] O. Splieth. Quadrantenansicht bei der positionsbestimmungsmethode. erstellt: 2021-02-25.
- [48] G. Welch, G. Bishop, et al. An introduction to the kalman filter. 1995.
- [49] K. Yu, K. Wen, Y. Li, S. Zhang, and K. Zhang. A novel nlos mitigation algorithm for uwb localization in harsh indoor environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(1):686–699, 2018.
- [50] Y. Yuan, F. Shen, and X. Li. Gps multipath and nlos mitigation for relative positioning in urban environments. *Aerospace Science and Technology*, 107, 2020.
- [51] R. Zhang, L. Song, A. Jaiprakash, T. Talty, A. Alanazi, A. Alghafis, A. A. Biyabani, and a. Ozan Tonguz. Using ultra-wideband technology in vehicles for infrastructure-free localization. In *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 122–127, 2019.

A. Anhang

A.1. Quellcode

- rtms
 - o rtms_module.py
 - o evaluation_module.py
 - o position_functions.py
 - o send_testData.py
 - o plot_Data.py
- sensors
 - o imu_module.py
 - o pedelec_odometer.py
- navigation_app
 - o navigate.py

A.2. Auswertungsskript und Testdaten

A.2.1. Jupyter-Python Auswertungsskript

- o evaluate_test_xxx.py

A.2.2. Testdaten

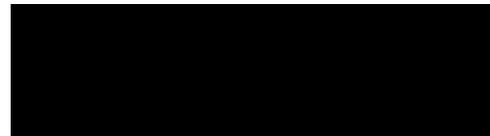
- Messfahrten 001-011
 - o gps_data.csv
 - o uwb_data.csv
 - o imu_data.csv
- Messfahrten 012-019
 - o gps_data.csv
 - o uwb_data.csv
 - o imu_data.csv
 - o odo_data.csv

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 30. März 2021

Ort, Datum

A solid black rectangular box used to redact the signature of the author.

Unterschrift