

Hochschule Darmstadt
- Fachbereich Informatik -

eCall mit Odometrie?

Verbesserte Positionsbestimmung für automatische Notrufsysteme durch
zusätzliche Auswertung der Reifenbewegung beim Ausfall des GPS

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)

vorgelegt von

Dominic Frei

Matrikelnummer: 712480

Referent: Prof. Dr. Wente
Korreferent: Prof. Dr. Wietzke

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig erstellt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Soweit ich auf fremde Materialien, Texte oder Gedankengänge zurückgegriffen habe, enthalten meine Ausführungen vollständige und eindeutige Verweise auf die Urheber und Quellen.

Alle weiteren Inhalte der vorgelegten Arbeit stammen von mir im urheberrechtlichen Sinn, soweit keine Verweise und Zitate erfolgen. Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn die vorstehende Erklärung sich als unrichtig erweist.

Zwingenberg, den 11. Februar 2010

Dominic Frei

Abstrakt

Das Projekt eCall wurde 2001 von der Europäischen Kommission gestartet. Dabei handelt es sich um ein automatisches Notrufsystem. Ist ein Fahrzeug an einem Unfall beteiligt, alarmiert es selbständig die Rettungskräfte und gibt seine Position bekannt. Diese Position wird mit GPS bestimmt.

Was passiert aber, wenn kein GPS-Signal verfügbar ist? Für diesen Fall müssen Alternativen betrachtet werden. Eine Möglichkeit besteht in der Odometrie. Dabei handelt es sich um die Berechnung der Positionsveränderung eines Fahrzeuges auf Grund seiner Reifenbewegung.

Diese Arbeit beschäftigte sich mit der Frage, ob die Odometrie für eCall als GPS-Ersatz verwendbar ist. Es wurde untersucht, wie genau diese Möglichkeit als einzige Alternative arbeitet, welche Fehler dabei entstehen und wie diese möglichst gering gehalten werden können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Thema und Ziel der Arbeit	3
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Automatische Notrufsysteme am Beispiel eCall	5
2.1.1	Einführung	6
2.1.2	Das Notrufsystem E112	7
2.1.3	Voraussetzungen für eCall	7
2.1.4	Bestandteile eines eCall-Moduls	9
2.1.5	Ablauf und Architektur eines eCalls	9
2.2	Ortung	12
2.2.1	Einführung	12
2.2.1.1	Ortungsarten	13
2.2.1.2	Ortungsmittel	13
2.2.1.3	Ortungsanwendungen	14
2.2.2	Grundprinzipien der kooperativen Ortungssysteme	15
2.2.2.1	Triangulation	16
2.2.2.2	Trilateration	16
2.2.2.3	Messung der Entfernungsdifferenz	18
2.2.2.4	Messung der Entfernungsänderung	18
2.2.3	Satellitensysteme für die kooperative Ortung	18
2.2.3.1	Global Positioning System (GPS)	19
2.2.3.2	Global Navigation Satellite System (GLONASS)	19
2.2.3.3	Galileo	20
2.2.4	Autonome Ortungsmöglichkeiten	21

2.2.4.1	Lokalisation durch Weglängenbestimmung	21
2.2.4.2	Lokalisation durch Richtungsbestimmung	23
2.3	Mathematische Grundlagen	26
2.3.1	Vektoren	26
2.3.2	Trigonometrische Funktionen	27
2.3.3	Bogenmaß	28
3	Positionsbestimmung auf Grund der Reifenbewegung	31
3.1	Berechnung der Positionsveränderung innerhalb eines Intervalls	33
3.1.1	Fahrt entlang einer Geraden	34
3.1.2	Fahrt entlang einer Kurve	35
3.1.2.1	Berechnung des Verschiebungsvektors \vec{v}	37
3.1.2.2	Berechnung des Abbiegewinkels α	37
3.1.2.3	Ableitung der neuen Position basierend auf den voran gegangenen Daten	38
3.2	Bestimmung der Position im globalen Koordinatensystem nach einem Intervall	40
3.3	Veränderung der Fahrtrichtung während eines Intervalls	42
4	Prototyp	45
4.1	Ziele des Prototypen	46
4.2	Design des Prototypen	47
4.2.1	Übersicht	47
4.2.2	Auslesen der Reifendaten	48
4.2.2.1	Bildung einzelner Intervalle	49
4.2.2.2	Rekonstruktion der gefahrenen Strecke aus den Pulsdaten	50
4.2.3	Auswertung der Reifendaten	50
4.2.4	Rekonstruktion des zurückgelegten Weges	51
4.2.5	Verifikation des mathematischen Modells	52
5	Probleme bei der Berechnung	57
5.1	Details zum Odometer	58
5.2	Systematische Fehler	60
5.2.1	Fehler bei der Aufzeichnung	60
5.2.1.1	Fehler bei der Längenbestimmung	61
5.2.1.2	Fehler bei der Winkelbestimmung	62

5.2.1.3	Fehler bei der Geschwindigkeitsbestimmung	64
5.2.2	Fehler bei der Bestimmung der weiteren Variablen für die Berechnung	65
5.2.2.1	Ungenauere Kenntnis des Reifenumfanges	65
5.2.2.2	Unterschiedliche Reifenumfänge	66
5.3	Zufällige Fehler	67
5.3.1	Schlupf	67
5.3.2	Ungenauigkeit durch Steigung und Gefälle	68
6	Evaluation	71
6.1	Vorverarbeitung der Messdaten	71
6.1.1	Behandlung von minimalen Pulsunterschieden	72
6.1.1.1	Einfaches Ignorieren minimaler Pulsunterschiede	73
6.1.1.2	Alternierendes Ignorieren minimaler Pulsunterschiede	74
6.1.1.3	Ignorieren minimaler Pulsunterschiede unter Einbeziehung der Kurven	74
6.1.1.4	Vergleich mit der zweiten Achse	75
6.1.1.5	Glättung von Minimalunterschieden	76
6.1.2	Betrachtung der Vor- und Nachteile einer Mindestpulszahl	76
6.1.3	Approximation	78
6.2	Vorstellung und Auswertung der Ergebnisse	78
6.2.1	Teststrecke	79
6.2.2	Berechnete Strecke	80
6.2.3	Auswertung der Fehler und der Genauigkeit	81
7	Schluss	87
7.1	Zusammenfassung der Arbeit	88
7.2	Bewertung der erzielten Ergebnisse	89
7.3	Ausblick	90
Literaturverzeichnis		I
Glossar		V
Stichwortverzeichnis		XVII

Abbildungsverzeichnis

2.1	Architektur von eCall aus [Kom06]	10
2.2	Erweiterte Architektur von eCall aus [Kom06]	11
2.3	Performancevorgaben von eCall aus [Kom06]	11
2.4	Drei Standflächen schneiden sich im zweidimensionalen Raum	16
2.5	Positionsbestimmung durch Trilateration	17
2.6	Parallelogrammregel für Vektoren	27
2.7	Sinus und Kosinus eines Winkels aus [AHK ⁺ 08]	28
3.1	Gesamtdarstellung zweier Kurven	33
3.2	Positionsveränderung bei gerader Fahrt	34
3.3	Alte und neue Position eines abbiegenden Fahrzeuges	35
3.4	Kurve im Koordinatensystem	36
3.5	Hilfsdreiecke zur Berechnung durch Sinus und Kosinus	39
3.6	Kurve im globalen Koordinatensystem	40
3.7	Drehung des Vektors \vec{v}	41
3.8	Berechnung der neuen Fahrtrichtung	43
4.1	Bestandteile des erarbeiteten Prototypen	47
4.2	Beispiel einer Logdatei	48
4.3	Beispiel einer einfachen Fahrt	53
4.4	Ausgabe für die erstellen Beispieldaten	55
5.1	Photoelektrische Abtastung (Inkrementalgeber)	59
5.2	Minimal messbare Weglänge in Abhängigkeit von der Odometerauflösung aus [Lut07]	62
5.3	Minimal messbare Richtungsänderung aus [Lut07]	64
5.4	Maximaler Geschwindigkeitsfehler pro Messintervall bei 50 km/h aus [Lut07]	65

6.1	Verursachung eines minimalen Pulsunterschiedes durch einen zeitlichen Versatz der Pulsfolge	72
6.2	GPS-Daten der Teststrecke	79
6.3	Berechnete Strecke (worst case)	80
6.4	Berechnete Strecke (best case)	81
6.5	Vergleich der Varianz für unterschiedliche Mindestpulszahlen und Mindestintervalldauern	84

Tabellenverzeichnis

2.1	Minimum Set of Data (MSD) aus [Kom06]	8
2.2	Unterschiedliche Ortungsarten aus [Man04]	13
2.3	Mittel der Ortung aus [Man04]	14
2.4	Anwendung der Ortung aus [Man04]	14
4.1	Beispieldaten für den Test des Prototypen	52
6.1	Vergleich der Abweichungen für unterschiedliche Parameter und Vorver- beitungsverfahren	83

Kapitel 1

Einführung

„Stellen Sie sich ein elektronisches Sicherheitssystem in Ihrem Auto vor, das im Falle eines Unfalls automatisch den Rettungsdienst anruft! Selbst wenn Sie bewusstlos sind, das System würde trotzdem die Einsatzkräfte über Ihren exakten Standort unterrichten. Krankenwagen und Feuerwehr wären informiert und ohne weiteres Zutun innerhalb von Minuten auf dem Weg. Und stellen Sie sich vor, dieses System würde europaweit und in jeder beliebigen Sprache funktionieren.“¹

Dieses System ist längst keine Zukunftsvision mehr. Bereits 2001 hat die Europäische Kommission dieses Projekt unter dem Namen eCall gestartet, mit dem Ziel, ein europaweit einsetzbares Notfallrufsystem zu entwickeln. Die Einführung erster Prototypen sollte im August 2009 nach vielen Entwicklungsjahren endlich gestartet werden, musste jedoch noch verschoben werden, da nicht alle Mitgliedsstaaten schon für die Umstellung auf die dafür notwendige Notrufnummer E112 bereit waren. Die Europäische Kommission wird im Laufe des ersten Quartals 2010 entscheiden, ob die Einführung von eCall verpflichtend wird. Im September 2010 sollen, laut eines Beschlusses der Europäischen Kommission, Prototypen des Notrufsystems in ausgewählten Mitgliedsstaaten der EU getestet werden.²

Ein Teilprojekt von eCall war die Einführung der einheitlichen, europaweiten Notrufnummer 112. Dieser Teil und damit die Sicherstellung, dass es nun eine europaweit einheitliche

¹[Kom09], S. 1.

²vgl. [Koma].

Notrufnummer gibt, wurden bereits erfüllt. „Bei 1,2 Millionen Verkehrsunfällen auf den Strassen der Europäischen Union sterben jährlich etwa 39.000 Menschen und 1,7 Millionen werden verletzt.“³ Durch die Einführung von eCall soll nun die Zahl der Toten und die Schwere der Verletzungsfolgen bei Verkehrsunfällen durch eine schnellere Reaktionszeit vermindert werden. Die Europäische Kommission geht davon aus, dass sich durch eCall etwa 2.500 Menschenleben retten lassen und die Schwere der Unfallfolgen um etwa 15% zurück geht, da die verletzten Personen dank eCall schneller behandelt werden können.⁴

1.1 Motivation

Ein zentraler Bestandteil von eCall ist die Positionsbestimmung. Die Position wird, wie bei Navigationssystemen, über einen GPS⁵-Empfänger ermittelt. Sofern ein ausreichender Empfang von Satelliten vorhanden ist, kann hiermit die Position am einfachsten bestimmt werden. Hierfür sind mindestens vier Satelliten notwendig. Es gibt jedoch viele Situationen, in denen die Verbindung und damit die Positionsbestimmung unterbrochen sein kann. Hierzu zählen unter anderem Tunnel, Parkhäuser und dichte Wälder. Ein solcher Verbindungsabbruch ist für Navigationssysteme noch vernachlässigbar, da der weitere Streckenverlauf ausreichend genau geschätzt werden kann. Jedoch ist dies für Notrufsysteme nur eine schlechte Option.

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine Alternative zur Positionsbestimmung zu erarbeiten, für Situationen, in denen der GPS-Empfang nicht mehr ausreichend ist. Hierfür ist zusätzlich zu beachten, dass die Europäische Kommission beabsichtigt, „[...] ein kostengünstiges und einheitliches Notrufsystem“⁶ zu schaffen. Im Rahmen der Arbeit sollen daher besonders Möglichkeiten im Vordergrund stehen, welche zu diesem Ziel beitragen.

³[Kom09], S. 1.

⁴vgl. [Koma].

⁵Global Positioning System: Satellitengestützte Positionsbestimmung

⁶[Kom09], S. 2.

1.2 Thema und Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit sollen alternative Möglichkeiten der Positionsbestimmung beleuchtet werden. Hierbei gibt es unterschiedliche Ansätze. Hierzu zählt auch die Auswertung der Reifenbewegung des Fahrzeuges. Dies wird als Odometrie bezeichnet.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, heraus zu arbeiten, wie basierend auf der Reifenbewegung auf die momentane Position eines Fahrzeuges geschlossen werden kann. Für diesen Zweck soll ein mathematisches Modell angefertigt werden, welches eine Vorgehensweise zur Positionsbestimmung beschreibt. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist das Auswerten von bereits aufgezeichneten Daten und die Überprüfung auf ihre Verwendbarkeit. Bei diesen Tests sollen Probleme herausgearbeitet und Lösungen vorgestellt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 dieser Arbeit werden zunächst Grundlagen erläutert, die für die folgenden Kapitel notwendig sind. Dabei werden automatische Notrufsysteme am Beispiel von eCall erklärt und dessen Funktionsweise und Architektur dargestellt. Des Weiteren wird die Ortung und speziell die Positionsbestimmung beschrieben. Es werden autonome und kooperative Ortungssysteme, sowie Alternativen zu GPS vorgestellt. Eine dieser Alternativen ist die in dieser Arbeit thematisierte Auswertung der Reifenbewegung mit Hilfe der Odometrie.

In Kapitel 3 wird diese Alternative näher beleuchtet. Es stellt somit den theoretischen Teil der Arbeit dar und beschäftigt sich mit allen notwendigen Details der Positionsbestimmung eines Fahrzeuges.

Anschließend wird in Kapitel 4 der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prototyp vorgestellt. In Kapitel 5 werden die Probleme bei der Odometrie erläutert und in Kapitel 6 die Ergebnisse gezeigt. Lösungsansätze sind ebenfalls in diesem Kapitel beschrieben. Abschließend wird in Kapitel 7 die Arbeit zusammengefasst und bewertet. Am Ende erfolgt ein abschließender Ausblick.

Die vorliegende Arbeit richtet sich vor allem an Personen, die mit Notrufsystemen, Navigationssystemen und Positionsbestimmung arbeiten. Basierend auf dem Grundlagenkapitel können auch weitere Interessierte, die über ein mathematisches und technisches Grundwissen verfügen, Zugang zu dieser Arbeit finden.

Die einzelnen Kapitel dieser Arbeit sind weitestgehend unabhängig voneinander lesbar. Im Grundlagenteil wird auf das nötige Vorwissen eingegangen, welches von sachkundigen Lesern jedoch ausgelassen werden kann. Kapitel 3 beschreibt den mathematischen Teil der Arbeit. Kapitel 4 stellt das Design und die Ergebnisse des Prototypen vor und baut auf den mathematischen Berechnungen auf. Jedoch sind die Ausführungen zu den Ergebnissen und die Beschreibung von Fehlern und Lösungen auch ohne die detaillierte Kenntnis des 3. Kapitels möglich.

Kapitel 2

Grundlagen

Dieses Kapitel legt das Fundament für das weitere Verständnis dieser Arbeit. Zunächst wird das automatische Notrufsystem eCall vorgestellt. Hierbei werden die Komponenten, Funktionsweise sowie die nötigen Voraussetzungen erläutert. Anschließend wird die Ortung und Positionsbestimmung dargestellt und Systeme gezeigt, mit denen diese durchgeführt werden kann. Es werden die unterschiedlichen Formen der Ortung und die Alternativen zu GPS aufgezeigt. Im letzten Teil werden mathematische Grundlagen zusammen gefasst, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden.

2.1 Automatische Notrufsysteme am Beispiel eCall

Ein wichtiger Punkt dieser Arbeit ist das automatische Notrufsystem eCall. Am seinem Beispiel sollen in diesem Kapitel automatische Notrufsysteme vorgestellt werden. Hierzu gehört eine Darstellung des Nutzens eines solchen Systems, ebenso wie die Funktionsweise und dafür notwendige Voraussetzungen, welche erfüllt sein müssen, um solche Systeme nutzen zu können.

Die Grundlagen zu Notfallrufsystemen und eCall im Speziellen beziehen sich größtenteils auf [Koma], [Komb] und [Pfe08]. Alle weiteren Einzelnachweise sind an entsprechender Stelle angegeben.

2.1.1 Einführung

Bei eCall handelt es sich um ein automatisches Notrufsystem, das wie andere Fahrerassistenzsysteme, zu den fahrzeugautonomen Technologien gehört. Andere Beispiele dafür sind:¹

- Anti-Blockier-System, Bremsassistent, automatische Abstandsregelung (zur Vermeidung von Auffahrunfällen)
- Fahrdynamikregelungen
- Spurhalteassistent
- Systeme zur Sichtverbesserung

Sobald bei einem Unfall bestimmte Trigger ausgelöst werden, wie etwa das Auslösen des Airbags, wird das automatische Notrufsystem aktiv und ein Notruf abgesetzt. Bei diesem automatischen Notruf wird ein standardisierter Datensatz übersandt, der unter anderem den Unfallzeitpunkt und die genauen GPS-Koordinaten enthält. Der Notruf kann auch durch Tastendruck manuell abgesetzt werden. Zusätzlich zur Datenverbindung wird auch noch eine Sprachverbindung aufgebaut, über welche die Notrufzentrale zu möglicherweise verletzten Personen Kontakt aufnehmen kann.

Automatische Notrufsysteme sind schon seit einigen Jahren erhältlich, jedoch nur von einzelnen Fahrzeugherstellern, die diese für ihre eigenen Fahrzeuge einsetzen. Meist sind die Notrufsysteme auch nur in Fahrzeugen höherer Klassen vorzufinden. Mit der eCall-Initiative will die Europäische Kommission ein bezahlbares System entwickeln, das zudem eine Abdeckung von möglichst 100% bieten soll. Dies gilt sowohl für die Geräte in den Fahrzeugen, als auch für die Erreichbarkeit in allen EU-Mitgliedsstaaten. Die Kosten sollen dabei nicht mehr als 100 Euro betragen.

Jährlich sterben etwa 39.000 Menschen bei 1,2 Millionen Verkehrsunfällen. Durch automatische Notrufsysteme wie eCall soll die Zahl der Toten und die Schwere der Unfallfolgeverletzungen deutlich gesenkt werden. Die Eintreffzeiten der Rettungskräfte sollen um 50% im ländlichen und um 40% im städtischen Bereich reduziert werden, wodurch jährlich bis zu 2.500 Menschenleben in Europa gerettet werden könnten. Auf Grund

¹vgl. [ADA08]

der schnelleren Reaktionszeit werden die Chancen für Verletzte deutlich verbessert. Ein solches System bietet auch volkswirtschaftliches Sparpotential. Schätzungen gehen von etwa 26 Millionen Euro aus, sofern alle Fahrzeuge mit eCall ausgerüstet sind.

2.1.2 Das Notrufsystem E112

eCall baut auf E112 (Enhanced 112) auf. E112 ist eine Erweiterung der einheitlichen Notrufnummer 112. Hier wird unter anderem zusätzlich ein Positionssignal mitgesendet. Bis zur vollständigen Einführung von eCall soll in allen EU-Mitgliedsstaaten die Notrufnummer 112 als einheitliche Notrufnummer gelten. In jedem Mitgliedsstaat soll per Festnetz und Mobilfunktelefon ein Notruf über eine Nummer abgesetzt werden können und die Notrufzentrale soll mehrsprachig Anrufe entgegennehmen können. Oft ist es der Fall, dass Anrufer ihren Aufenthaltsort nicht exakt angeben können. In diesen Fällen muss zumindest die Notrufzentrale genau über den Unfallort Bescheid wissen, um die Rettungskräfte leiten zu können.

Damit eCall funktioniert müssen die Notrufzentralen solche E112-Anrufe entgegennehmen können. Der von eCall gesendete Minimaldatensatz, der unter anderem die Position enthält muss empfangen und verarbeitet werden. Der Aufbau und Inhalt eines Minimaldatensatzes (Minimum Set of Data, MSD), wie er von der Europäischen Kommission vorgesehen ist, kann Tabelle 2.1 entnommen werden.

2.1.3 Voraussetzungen für eCall

Für das erfolgreiche Funktionieren von eCall müssen jedoch eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein. eCall ist bis zum jetzigen Zeitpunkt noch in der Entwicklungsphase. Zunächst müssen die Fahrzeuge mit dem entsprechenden System ausgestattet werden. Dies soll ab 2011 als Option für alle Neuwagen angeboten werden.

Die Notrufzentralen und Rettungsdienste müssen die von eCall gesendeten E112-Anrufe entgegen nehmen und verarbeiten können. Die Koordinaten müssen an Rettungskräfte übermittelt und angezeigt werden. Zusätzliche Alarmierung der Feuerwehr oder prophy-

Byte No.	Name	Size	Type	Unit		Description
1	Control	1 Byte	Integer		M	Bit 7: 1 = Automatic activation Bit 6: 1 = Manual activation Bit 5: 1 = Test Call Bit 4: 1 = No Confidence in position Bit 3: Entity type could be added Bit 2: Entity type could be added Bit 1: Entity type could be added Bit 0: Entity type could be added
2	Vehicle identification	20 Bytes	String		M	VIN number according ISO 3779
3	Time stamp	4 Bytes	Integer	UTC sec	M	Timestamp of incident event
4	Location	4 Bytes	Integer	milliarcsec	M	GNSS Position Latitude (WGS84)
		4 Bytes	Integer	milliarcsec	M	GNSS Position Longitude (WGS84)
		1 Byte	Integer	Degree	M	Direction of Travel (Based on last 3 positions)
5	Service Provider	4 Bytes	Integer	IPV4	O	Service Provider IP Address
6	Optional Data	106 Bytes	String	To be defined	O	Further data on e.g. crash information encoded in XML Format
	Sum:	140 Bytes				

M – Mandatory data field

O – Optional data field (default blank characters)

Tabelle 2.1: Minimum Set of Data (MSD) aus [Kom06]

laktische Berichterstattung an ein Krankenhaus stehen hierbei ebenso im Vordergrund, wie die Tatsache, dass bei einer aufgebauten Sprachverbindung der Notrufmitarbeiter in der Lage sein muss, die jeweilige Sprache der Insassen zu verstehen.

Bereits 2005 hat die Europäische Kommission die Mitgliedsstaaten aufgerufen, eine Reihe von Maßnahmen zu ergreifen, um eCall für die Bürger nutzbar zu machen:

- Ausdrückliche Verpflichtung zu eCall mittels des eCall-Memorandums
- Förderung der europäischen Notrufnummer 112
- Ausrüstung der Notrufzentralen für die Verarbeitung von E112-Notrufen
- Modernisierung der gesamten Rettungskette
- Ausbildung des gesamten Personals an der neuen Technik

Hierbei sind die einzelnen Mitgliedsstaaten jedoch unterschiedlich schnell voran geschritten, was die ursprünglich geplante Einführung im Jahr 2009 verzögerte. Die Europäische Kommission fasst daher auch ernsthaft eine eCall-Verordnung ins Auge, sollten die Mitgliedsstaaten nicht die notwendige Unterstützung bei der Einführung von eCall bieten.

2.1.4 Bestandteile eines eCall-Moduls

Um in einem Fahrzeug eCall zu installieren, sind folgende Bauteile notwendig:²

- GPS-Empfänger (für die Position)
- GSM-Antenne (für den Anruf)
- Steuergerät zur Ermittlung des Standortes und Erstellung des Minimaldatensatzes
- Crash-Sensor (beispielsweise im Airbag-System)
- Mikrofon und Lautsprecher für Sprachverbindungen
- Notstromversorgung
- manuelle Notruftaste
- Kontrollleuchte für die Funktionsfähigkeit

Fahrzeuge, die mit diesen Bestandteilen ausgestattet sind, wurden unter anderem vom ADAC bereits erfolgreich getestet.

2.1.5 Ablauf und Architektur eines eCalls

Der Ablauf, wie er von der Europäischen Kommission vorgeschlagen wird, ist in Abbildung 2.1 zu sehen:

1. Das eCall-System initiiert einen Notruf, sobald die dafür vorgesehen Sensoren ausgelöst oder der manuelle Rufknopf gedrückt wurde. Der Notruf richtet sich an die Notrufzentrale (Public Safety Answering Point, PSAP) und beinhaltet sowohl eine Sprachverbindung, als auch die E112-Daten.

²vgl. [ADA08]

2. Der eCall (Daten und Stimme) wird zunächst vom Mobilfunkanbieter (Mobile Network Operator, MNO) entgegen genommen und als Notruf erkannt und behandelt. Vor der Weiterleitung an den PSAP wird dem Anruf eine CLI (Caller Line Identification, Rufnummer des Anrufers) und zusätzlich noch die beste, ermittelbare Position hinzugefügt. Dieses Paket aus CLI, Position und eCall-MSD (Minimum Set Of Data) wird dann an den zuständigen PSAP weiter geleitet.
3. Der PSAP nimmt den Anruf entgegen und bestätigt der eCall-Einheit im Fahrzeug den Empfang der Daten.

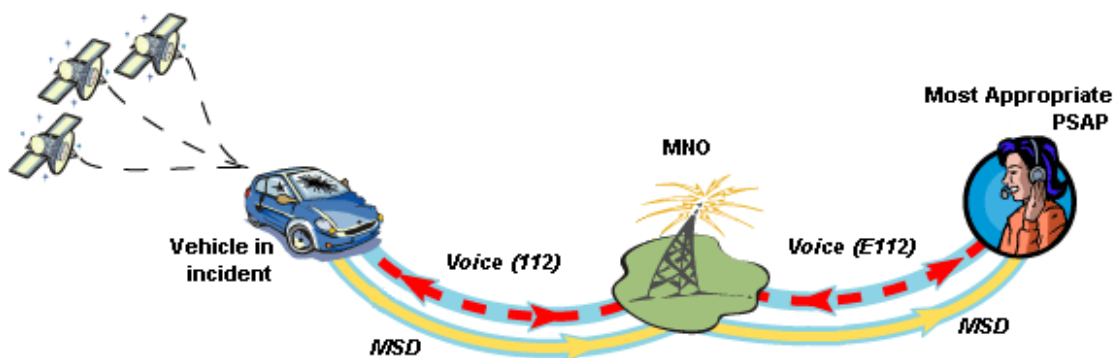


Abbildung 2.1: Architektur von eCall aus [Kom06]

Für dieses Standard-System ist auch die Möglichkeit einer Erweiterung vorgesehen, die weitere Informationen bereit stellen und so eine noch bessere Versorgung bringen könnte. Diese ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

Bei dieser Erweiterung werden die beim Mobilfunkanbieter eingehenden Daten genutzt, um direkt bei einem Service Provider (SP) weitere Informationen abzufragen, die zu dem verunglückten Fahrzeug gehören. Diese Informationen werden vom SP dann wiederum zum PSAP gesendet, um dort ebenfalls bei Eintreffen des Notrufes schon vorzuliegen.

Die geplanten Antwortzeiten für eCall sind in Abbildung 2.3 zu sehen. Nach maximal 100ms soll das Signal der Crash-Sensoren verarbeitet sein und der Anruf begonnen werden. Dieser wiederum soll maximal 20 Sekunden später zustande gekommen sein. Während des eCalls laufen Daten- und Sprachübertragung parallel. Für diese beiden Übertragungen sollen die Performance-Vorgaben aus Abbildung 2.3 gelten. Insgesamt sollen hierfür weniger als 14 Sekunden benötigt werden.

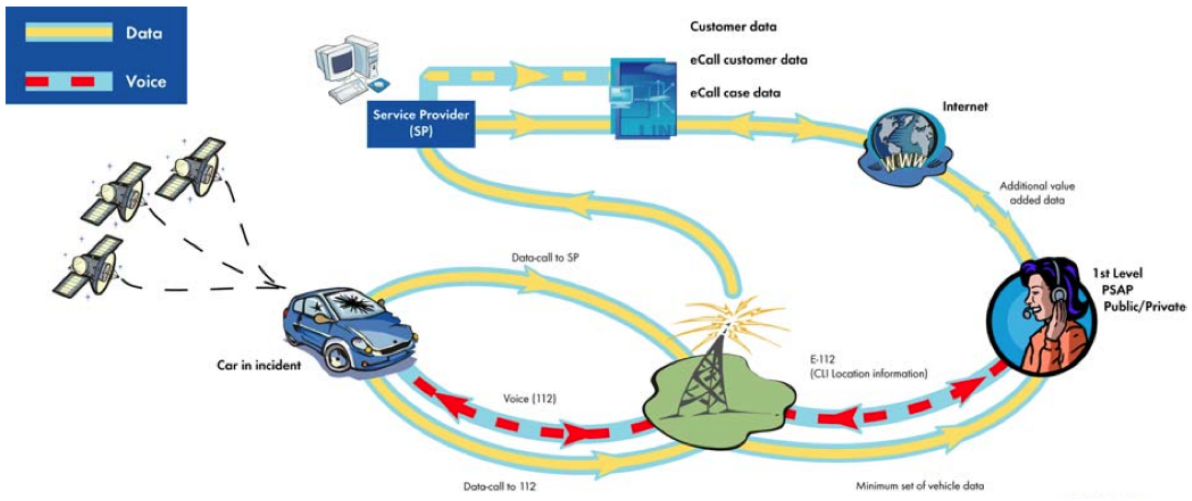


Abbildung 2.2: Erweiterte Architektur von eCall aus [Kom06]

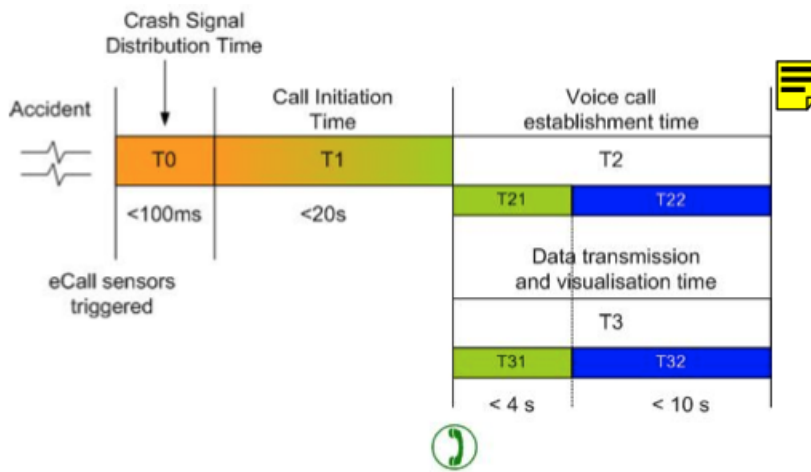


Abbildung 2.3: Performancevorgaben von eCall aus [Kom06]

2.2 Ortung

In diesem Kapitel sollen Grundlagen zur Ortung und Positionsbestimmung dargestellt werden. Ein Bestandteil von Notrufsystemen ist die Bestimmung der aktuellen Position des verunglückten Fahrzeuges. Nach einer Einführung werden zunächst die Grundprinzipien der kooperativen Ortung beschrieben, gefolgt von einer Vorstellung der aktuellen Satellitensysteme, die für diese Ortung genutzt werden können. Abschließend sollen autonome Ortungsmöglichkeiten anhand verschiedener Beispiele beleuchtet werden. Zu diesen Alternativen zählt unter anderem das in dieser Arbeit dargestellte Verfahren, wie es bei Differential-Odometern angewandt wird.

Die Ausführungen in diesem Kapitel sind hauptsächlich aus [Man04] und [Lut07] entnommen. Alle weiteren Einzelnachweise sind an den entsprechenden Stellen erbracht.

2.2.1 Einführung

Als Ortung bezeichnet man die „[...] Bestimmung des momentanen Standortes eines ruhenden oder sich bewegenden Objektes“. ³ Das Ziel der Ortung ist die Bestimmung der Position eines Objektes. Normalerweise ist die Ortung dreidimensional und es werden geographische Länge und geographische Breite, sowie die Höhe über dem Erdboden bestimmt (positioning). Es gibt jedoch viele Anwendungsgebiete, in denen nur zwei Dimensionen notwendig sind (location). Hierzu zählt zum Beispiel auch die Positionsbestimmung bei Notrufsystemen und Navigationssystemen, da bei diesen Fällen angenommen wird, dass sich das zu ortende Objekt direkt auf dem Boden befindet und somit die Höhe nicht notwendig ist.

In diesem Abschnitt werden zunächst die Arten und Funktionsprinzipien der Ortung vorgestellt, zwischen denen unterschieden werden muss. Einen wichtigen Teil stellt die Beschreibung des bei Notrufsystemen eingesetzten GPS dar. Außerdem werden Alternativen im Bereich der autonomen vorgestellt.

³[Man04], S. 1.

2.2.1.1 Ortungsarten

Zunächst kann bei der Ortung zwischen verschiedenen Arten unterschieden werden: Eigenortung und Fremdortung. Während bei der ersteren die Position selbstständig vom aufzufindenden Objekt festgestellt wird, ist für letzteres ein entferntes System zuständig. In beiden Fällen kann die Ortung autonom oder kooperativ erfolgen. Autonom bedeutet hierbei, dass das jeweilige System, welches die Berechnung durchführt, nicht auf andere Systeme angewiesen ist. Eine autonome Eigenortung wäre also beispielsweise die Positionsbestimmung durch die in einem Fahrzeug vorhandenen Sensoren. GPS stelle eine kooperative Eigenortung dar, da hier außerhalb liegende Bezugspunkte (die Satelliten) genutzt werden. Die Position wird jedoch vom Fahrzeug und nicht von den Satelliten bestimmt.

Eine Übersicht der Ortungsarten ist in Tabelle 2.2 dargestellt. In Abschnitt 2.2.2 werden die Grundprinzipien der kooperativen Ortung näher erläutert.

	Art der Ortung			
	Eigenortung		Fremdortung	
	autonom	kooperativ	autonom	kooperativ
kinematisch	o	x	x	x
akustisch	x	x	o	x
optisch	o	x	o	x
funktechnisch	o	o	o	o

Tabelle 2.2: Unterschiedliche Ortungsarten aus [Man04]

2.2.1.2 Ortungsmittel

Für die Nutzung der in 2.2.1.1 vorgestellten Arten der Ortung gibt es unterschiedliche Ansätze, um die notwendigen Informationen für die Ortung zu gewinnen. Hierzu gehören die in Tabelle 2.3 dargestellten Mittel: physikalische Kräfte, akustische und elektromagnetische Wellen. Bei der Satellitenortung werden vorrangig elektromagnetische Wellen im funktechnischen Bereich eingesetzt. Bei anderen Aufgaben können wiederum Laser im optischen Bereich eingesetzt werden. Die ebenfalls genannten Schallwellen sind auf Grund

Mittel der Ortung			
physikalische Kräfte	akustische Wellen	elektromagn. Wellen	
		Lichtwellen	funktechnische Wellen
statische Kräfte	Hörbereich	Infrarotbereich	von Längswellen bis Millimeterwellen
dynamische Kräfte	Ultraschall	Sichtbereich	
magnetische Kräfte	Hyperschall	Ultraviolettbereich	

Tabelle 2.3: Mittel der Ortung aus [Man04]

der damit einhergehenden Ungenauigkeiten bei einer Positionsbestimmung gegenüber GPS eher ungeeignet.

2.2.1.3 Ortungsanwendungen

Die Anwendung der Ortung lässt sich in zwei große Hauptgruppen aufteilen, die in Tabelle 2.4 zu sehen sind: Positionsbestimmung und Navigation.

Während es bei der Positionsbestimmung lediglich auf die Angabe der Position ankommt und keine Echtzeitanforderung vorliegt, ist bei der Navigation die Positionsbestimmung nur ein Teil, der genutzt wird, um von einem Ausgangspunkt zu einem bestimmten Zielpunkt zu gelangen. Bei der Navigation wiederum ist die Ortung immer in Echtzeit durchzuführen, also zeitnah.

Anwendung der Ortung	
Positionsbestimmung	Navigation
Geodäsie	Raumfahrt
Objektvermessung	Luftfahrt
Exploration	Fahrt zu Wasser
Überwachung	Fahrt zu Lande
Forschung	

Tabelle 2.4: Anwendung der Ortung aus [Man04]

2.2.2 Grundprinzipien der kooperativen Ortungssysteme

Bei kooperativen Ortungssystemen werden von einem Sender Signale ausgesandt, die von einem Empfänger aufgenommen und ausgewertet werden, um daraus die Position zu bestimmen. Hierbei kann das zu ortende Objekt sowohl Sender, als auch Empfänger sein. Empfängt es die Daten selbst und wertet sie aus, so spricht man von der in Kapitel 2.2.1.1 dargestellten kooperativen Eigenortung. Sendet das Objekt nur Signale und die Auswertung wird vom Empfänger vorgenommen, so liegt eine kooperative Fremdortung vor. In beiden Fällen muss sich der Gegenpart zum ortenden Objekt an einem „[...] durch seine Koordinaten definierten Punkt“⁴ befinden, der dann als Bezugspunkt für die Berechnung der Position dient. Bei der Fremdortung wird dann, sofern nötig, das Ergebnis an das zu ortende Objekt zurück gesandt, damit diese dort weiter genutzt werden können.

Messgrößen, die für die beiden Verfahren verwendet werden, sind Amplituden von Spannungen, Frequenzen und Phasenwinkel von Schwingungen, Impulslaufzeiten und Modulationsgrade. Alle Punkte, an denen der gleiche Betrag für eine solche Messgröße ermittelt wird, befinden sich im Raum auf einer Fläche, die Standfläche genannt wird. Die Fläche kann eben sein, aber auch eine Kugeloberfläche oder einen Rotationshyperboloiden beschreiben. Um die Position im Raum bestimmen zu können, müssen drei Koordinaten ermittelt werden, wofür drei Standflächen notwendig sind. Der Schnittpunkt dieser drei Flächen ergibt den Standpunkt des zu ortenden Objektes. Der zweidimensionale Fall ist in Abbildung 2.4 dargestellt. In manchen Fällen kann eine dieser Standflächen bereits bekannt sein. Beispielsweise ist die Erdoberfläche bei der Navigation eine dieser Standflächen, auf der sich der Standpunkt befinden muss. Wichtig ist hierbei, dass bei einer Ortung über große Distanzen die Erde, auf Grund ihrer Krümmung, nicht mehr als horizontale Ebene betrachtet werden kann. Hierfür wird ein sogenanntes Ellipsoid genutzt, auf dem mit den Gesetzen der sphärischen Geometrie zu rechnen ist.

Die Ortungssysteme können auf Grund der ermittelten geometrischen Größen in vier Kategorien eingeteilt werden, die in den folgenden Punkten vorgestellt werden:

- Winkel

⁴[Man04], S. 3.

- Entfernung
- Entfernungsdifferenz
- Entfernungsänderung

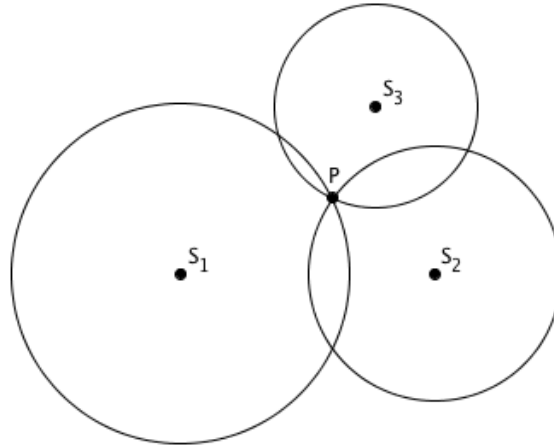


Abbildung 2.4: Drei Standflächen schneiden sich im zweidimensionalen Raum

2.2.2.1 Triangulation

Die erste Möglichkeit der Ortung besteht in der Messung der Winkel zwischen den bekannten Standflächen. Diese Methode wird Triangulation genannt. In der Ebene müssen zwei Winkel bekannt sein, damit der Standpunkt bestimmt werden kann. Schneidet man die Koordinatensysteme der Bezugspunkte, so sind die resultierenden Standlinien die benötigten Winkel für diese Berechnung.

2.2.2.2 Trilateration

Die zweite Variante ist die Trilateration. Dabei handelt es sich um eine Entfernungsmessung zu festen Bezugspunkten. Die Standflächen, die hierbei entstehen, sind Kugeln. Alle Objekte, die eine bestimmte Entfernung r zu einem Bezugspunkt haben, können sich auf der Kugeloberfläche mit dem Radius r um diesen befinden. Werden zwei solcher Punkte geschnitten, entsteht zunächst ein Kreis, der die Standlinie darstellt. Für eine Bestimmung der Position auf der Erde werden zwei solcher Kreise benötigt, die sich

wiederum in zwei Punkten schneiden. Hierbei handelt es sich um die reale Position P und die scheinbare Position P' . Den Ausschluss der scheinbaren Position kann man durch eine weitere Messung gewährleisten oder durch ein zusätzliches Vorwissen, wie etwa der letzten bestimmten Position, falls nur zwei Bezugspunkte vorhanden sind (siehe hierzu auch Abbildung 2.5). Vorwissen kann hier auch bedeuten, dass eine Position auf der Erdoberfläche gesucht wird. Liegt P auf der Erde, P' aber im Weltall, so kann nur P der richtige Punkt sein und P' kann verworfen werden.

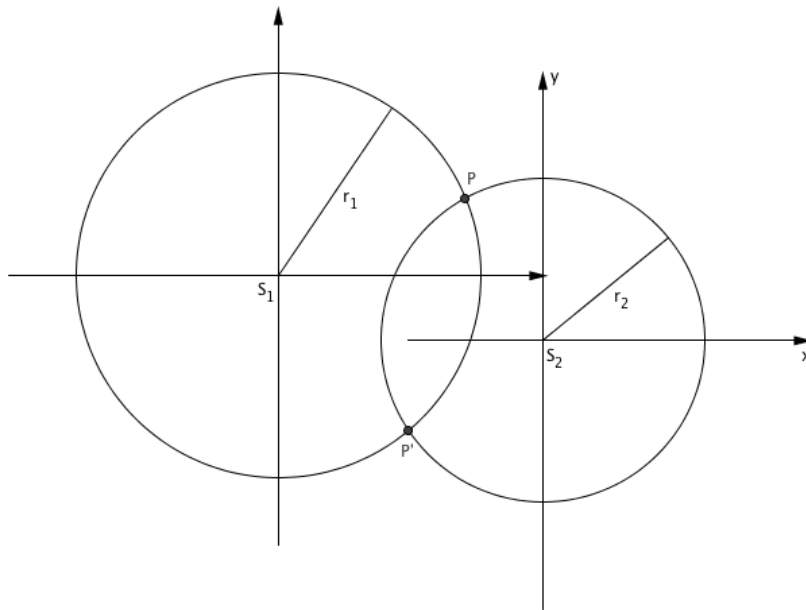


Abbildung 2.5: Positionsbestimmung durch Trilateration

Die Messung der in dieser Variante verwendeten Entfernung geschieht normalerweise über Laufzeiten. Es werden elektromagnetische Wellen ausgesandt, die sich in alle Richtungen und mit konstanter Geschwindigkeit ausbreiten. Anhand der gemessenen Zeit, die ein solches Signal für den Ablauf der Strecke benötigt, kann die Entfernung zum Bezugspunkt berechnet werden. Hierfür gibt es zwei Berechnungsmethoden:

- Einweg-Methode: Ein Signal durchläuft die zu messende Strecke nur einmal. Es wird ausgesandt und beim Empfänger direkt ausgewertet.
- Zweiweg-Methode: Hierbei wird das Signal vom Sender abgeschickt, vom Empfänger jedoch wieder zurück gesandt, bevor es beim ursprünglichen Sender empfangen und ausgewertet wird. Die Strecke wird hier also zwei mal durchlaufen.

2.2.2.3 Messung der Entfernungsdifferenz

Eine weitere Methode zur Positionsbestimmung liegt in der Messung der Entfernungsdifferenz. Hier sind nun die Standflächen Oberflächen von Rotationshyperboloiden. Die Beschreibung hierfür lautet: „Der geometrische Ort aller Punkte im Raum, an denen die Differenz der Entfernung zu zwei Bezugspunkten den gleichen Betrag hat, ist ein zweischaliger Rotationshyperboloid, dessen Brennpunkte die beiden Bezugspunkte sind.“⁵

Wenn sich die beiden Bezugspunkte auf der Erdoberfläche befinden, schneiden sie sich mit dieser in jeweils einer Hyperbel. Die beiden Hyperbeln liegen symmetrisch zueinander. Im Gegensatz zur Entfernungsmessung zu einem Bezugspunkt muss für die Messung der Entfernungsdifferenz ein zweiter Bezugspunkt genutzt werden, woraus dann wiederum die Position bestimmt werden kann, indem mit den Laufzeitdifferenzen gearbeitet wird.

2.2.2.4 Messung der Entfernungsänderung

Die letzte Variante beruht auf der Messung der Entfernungsänderung. Sie verläuft ähnlich der Ermittlung der Entfernungsdifferenz. Hier wird jedoch nicht zur gleichen Zeit die Entfernung zu zwei Bezugspunkten gemessen, sondern zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten die Entfernung zu einem Bezugspunkt. Die Differenzen der Entfernung Δs und der beiden Zeitpunkte Δt können dann zur Bestimmung der Position genutzt werden.

2.2.3 Satellitensysteme für die kooperative Ortung

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Möglichkeiten vorgestellt wurden, wie Positionen bei kooperativen Ortungssystemen ermittelt werden können, sollen jetzt drei der bekanntesten Vertreter der Satellitenortung vorgestellt werden. Eine zentrale Rolle spielt das bei Navigationssystemen und Notrufsystemen genutzte GPS. Weiterhin wird kurz auf das russische System GLONASS eingegangen und das sich derzeit noch im Aufbau befindende

⁵[Man04], S. 9.

europäische System Galileo. Diese und weitere Systeme sind in [Man04] oder [Bau97] vertieft.

2.2.3.1 Global Positioning System (GPS)

Das Global Positioning System (GPS) wurde ursprünglich vom amerikanischen Verteidigungsministerium für militärische Zwecke entwickelt, kann jedoch auch für zivile Anwendungen genutzt werden.

GPS umfasst insgesamt 24 Satelliten, die auf sechs unterschiedliche Umlaufbahnen aufgeteilt sind. Diese Umlaufbahnen sind um 60° zueinander geneigt, so dass die gesamten 360° der Erdkugel abgedeckt sind und garantiert werden kann, dass zu jeder Zeit, bei freier Sicht, vier Satelliten mit einer Mindesthöhe von 5° über dem Horizont empfangen werden können.⁶

Hieraus lässt sich allerdings auch ein Problem ableiten. Die freie Sicht ist nicht immer gegeben. In Gebäuden, wie zum Beispiel Parkhäusern oder in Tunneln funktioniert GPS nicht, da jeglicher Sichtkontakt zu den dafür notwendigen Satelliten fehlt. Dieses Phänomen nennt man Abschattung. Aber auch außerhalb von Gebäuden kann es zu einem Abriss der Positionsbestimmung mittels GPS kommen, falls nicht ausreichend viele Satelliten für die Ortung erreichbar sind. Dies kann zusätzlich in Wäldern oder dicht bebauten Städten zu Einschränkungen führen. Dieses Problem ist der Hauptgrund, warum weitere Verfahren erörtert und getestet werden müssen. So kann bei Ausfall des GPS ein Notrufsystem die Position möglichst genau ermitteln.

2.2.3.2 Global Navigation Satellite System (GLONASS)

Das Global Navigation Satellite System GLONASS ist das 1982 gestartete, russische Äquivalent zu GPS. Bei dieser Bezeichnung ist Vorsicht geboten: GNSS steht ebenfalls für Global Navigation Satellite System, ist jedoch der Ausdruck, der für Satellitennavigationssysteme im Allgemeinen genutzt wird, wodurch es zu Verwechslungen kommen

⁶vgl. [Ste01]

kann. Im Folgenden wird für das russische System daher nur die Abkürzung GLONASS genutzt, da diese eindeutig ist.

Bei GLONASS werden ebenfalls 24 Satelliten genutzt, die ursprünglich nur für militärische Zwecke entwickelt und zwischenzeitlich auf sieben Satelliten reduziert wurden. Bis Ende 2009 wurde aber wieder die ursprüngliche Anzahl von 24 Satelliten erreicht und GLONASS ebenfalls für zivile Zwecke freigegeben. Ein direkter Vergleich mit GPS wird in [See93] durchgeführt.

Die GLONASS-Satelliten sollen weiterhin für Hardwaretests bei Galileo eingesetzt werden. Außerdem besteht bereit eine Zusammenarbeit der USA mit der russischen Föderation, im Rahmen derer die Kompatibilität und Interoperabilität von GPS und GLONASS untersucht wird.⁷

2.2.3.3 Galileo

Bei Galileo handelt es sich, wie bei GPS und GLONASS, um ein Globales Satellitennavigationssystem (Global Navigation Satellite System, GNSS), jedoch ist Galileo für rein zivile Zwecke entwickelt worden und soll Unabhängigkeit von GPS und GLONASS bringen. Galileo soll also als öffentliche Dienstleistung betrieben werden.⁸

Das Galileo-System soll bis zur vollständigen Inbetriebnahme 30 Satelliten umfassen, die in einer geeigneten Konstellation (Walker-Konstellation) die Erde umrunden. Pro Bahnebene sind neun Satelliten zuzüglich eines Reservesatelliten geplant.

Im Rahmen von Galileo sollen mehrere Dienste (offene, sicherheitskritische, kommerzielle) angeboten werden, die auf verschiedenen Frequenzbändern betrieben werden. Weitere Details hierzu enthält unter anderem [Div]. Der offene Dienst soll kostenlos und frei empfangen werden können. Außerdem soll er eine höhere Verfügbarkeit und Genauigkeit als GPS bieten, womit Galileo ein direkter Konkurrent des amerikanischen Systems ist.

⁷vgl. [CWGW06]

⁸vgl. [Kom02]

Galileo soll bis 2013 voll betriebsbereit sein. Bis zu diesem Zeitpunkt werden noch weitere Tests durchgeführt.

2.2.4 Autonome Ortungsmöglichkeiten

Neben den zuvor beschriebenen kooperativen, sollen in diesem Abschnitt autonome Ortungsmöglichkeiten vorgestellt werden. Hierbei werden die Methoden zur Selbstlokalisierung nach Weglängenbestimmung und Richtungsbestimmung unterschieden, da hierfür jeweils unterschiedliche Instrumente zur Verfügung stehen. Diese Instrumente (Sensoren) sollen zum Abschluss der Grundlagen zur Ortung noch kurz vorgestellt werden.

Grundsätzlich ist bei den hier aufgelisteten Möglichkeiten zu beachten, dass nur eine Positionsänderung bestimmt werden kann. Es muss also zuvor die absolute Position auf der Erde als Bezugspunkt bekannt sein, damit die neue Position ebenfalls im globalen Koordinatensystem berechnet werden kann. Hier bietet sich das bei Notrufsystemen ohnehin genutzte GPS an, bei dessen Ausfall die letzte Position bekannt ist und für die weitere, autonome Ortung genutzt werden kann.

2.2.4.1 Lokalisation durch Weglängenbestimmung

Zur Bestimmung der Position eines Fahrzeuges können Sensoren genutzt werden, die eine Weglängenbestimmung gestatten. Hierzu zählen das Odometer, der Beschleunigungssensor und das Doppler-Radar. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

2.2.4.1.1 Odometer Das Odometer ist die einfachste Möglichkeit, die Strecke zu bestimmen, die ein Fahrzeug gefahren ist. Es kann entweder der Winkel gemessen werden, um den sich ein Reifen weiter bewegt hat oder mittels Impulsgebern auf optischer oder induktive Basis die Entfernung, die seit der letzten Messung gefahren wurde. Die Geschwindigkeit kann hieraus ebenfalls ermittelt werden. Das Prinzip des Odometers bildet die Grundlage dieser Arbeit und die entsprechenden Berechnungen werden im 3. Kapitel beschrieben.

Nach [BW99] gibt es unterschiedliche Bauarten von Odometern:

- mechanische und elektromechanische Sensoren
- Sensoren mit Reed-Kontakt (magnetischer Schalter)
- Hall-Sensoren
- elektrooptische Verfahren
- induktive Sensoren

Berührungslose Geräte, wie induktive Sensoren und Hall-Sensoren, sind gegenüber Schmutz und Vibration nahezu unempfindlich. Diese Messungen erfüllen höchste Anforderungen und werden daher auch für das ABS oft verwendet.⁹ Die Tatsache, dass diese Sensoren ohnehin in Fahrzeugen für das ABS verfügbar sind, bedeutet, dass es sich hierbei um eine kostengünstige Möglichkeit handelt, mit bereits gesammelten Daten zusätzliche Ortungsgenauigkeit zu gewinnen. Dies kommt der Forderung der Europäischen Kommission nach, dass das Notrufsystem bezahlbar sein soll, damit sie in alle neuen Fahrzeugen eingebaut werden können.

Eine Spezialform des Odometers, das Differential-Odometer, wird in 2.2.4.2.2 beschrieben.

2.2.4.1.2 Beschleunigungsmesser Als Beschleunigungssensoren werden Testmassen genutzt, die bei einer Beschleunigung des Fahrzeuges ausgelenkt werden. Über den Zusammenhang $F = m \cdot a$ kann dann aus der gemessenen Kraft die Beschleunigung berechnet werden. Hierfür gibt es zwei unterschiedliche Varianten:

- Pendel-Beschleunigungsmesser
- Schwingquarz-Beschleunigungsmesser

2.2.4.1.3 Doppler-Radar Bei einem Doppler-Radar bedient man sich des Doppler-Effektes. Dieser tritt auf, wenn ein Wellensender und ein Wellenempfänger sich einander nähern. Es kommt zu einer Veränderung der Frequenz des Signals. Diese Unterschiede können gemessen und daraus die Geschwindigkeit und die zurückgelegte Strecke gemessen

⁹vgl. [BG03]

werden.¹⁰ Diese Art der Messung wird vor allem im Schienenverkehr als Redundanz genutzt.

2.2.4.2 Lokalisation durch Richtungsbestimmung

Die Änderung der Richtung ist eine weitere Messgröße, die für die Positionsbestimmung genutzt werden kann. Hierfür können Drehratensensoren, Magnetometer und Differential-Odometer eingesetzt werden.

2.2.4.2.1 Magnetometer Beim Magnetometer handelt es sich um einen Sensor, der das Erdmagnetfeld misst und so die Nordrichtung bestimmt. So kann durch die Berechnung der Differenz des Winkels zur Fahrtrichtung die momentane Ausrichtung des Fahrzeuges berechnet werden. Dabei handelt es sich um eine absolute Angabe, die überdies vom Driftverhalten unabhängig ist. Jedoch gibt es eine örtliche Missweisung und jegliche Magnetfelder, die innerhalb oder außerhalb des Fahrzeuges vorhanden sind, stören diesen Sensor.¹¹ Dies führt zu einer ungenauen Messung, selbst nachdem stationäre, fahrzeuginterne Störungen kompensiert wurden.¹²

2.2.4.2.2 Drehratensensoren Drehratensensoren messen Winkelgeschwindigkeiten, aus denen wiederum eine Richtungsveränderung bestimmt werden kann. Hierfür muss die Anfangsrichtung bekannt sein. Durch Integration der Drehrate und Summation zur alten Richtung kann so die neue Richtung bestimmt werden. Da sie durch präventive Maßnahmen von elektromagnetischen Störfeldern unabhängig gemacht werden können, lassen sich Fehler beseitigen, die bei Magnetometern auftreten.

Dieser Sensor kann optisch, mechanisch oder elektronisch arbeiten. Einige Beispiele werden im Folgenden vorgestellt.

¹⁰vgl. [Kee95]

¹¹vgl. [Aus99]

¹²vgl. [Lut07]

Differential-Odometer Das Differential-Odometer ist eine Erweiterung des in 2.2.4.1.1 beschriebenen Odometers. Hierbei werden zwei, an gegenüberliegenden Seiten des Fahrzeuges angebrachte, Sensoren genutzt. Durch die Differenz der beiden Odometer ist somit zusätzlich zur Bestimmung der zurück gelegten Strecke auch die Auswertung der Richtungsänderung möglich. Diese Tatsache macht sich die vorliegende Arbeit zu Nutze und beschreibt das genaue Vorgehen der Auswertung im 3. Kapitel. Differential-Odometer können sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse angebracht werden. Hierfür bietet sich eine nicht angetriebene Achse an, da dort kein Antriebsschlupf vorliegt.

Mechanischer Kreisel Der mechanische Kreisel gehört zu den ältesten Drehratensensoren. Hierbei wird ein Kreisel einseitig gefesselt und der sich darin befindende Rotor dreht sich mit hoher Geschwindigkeit um die Drehachse. Sobald ein Drehmoment auf die Eingangsachse wirkt, versucht der Kreisel durch eine Präzession um die Ausgangsachse auszuweichen. Dort kann bei konstanter Drehzahl und kleiner Auslenkung ein Moment gemessen werden, das direkt proportional zur Drehgeschwindigkeit um die Eingangsachse ist.

Faseroptischer Kreisel Faseroptische Kreisel sind kleiner und günstiger als mechanische Kreisel und eignen sich daher gut für die Navigation. Das Messprinzip basiert auf dem Sagnac-Effekt. Dieser Effekt tritt in einem rotierenden Bezugssystem auf und kann zur Bestimmung der Drehbewegung genutzt werden. Bei diesem Kreisel wird linear polarisiertes Laser-Licht durch eine lichtemittierenden Superluminiszenzdiode (SLD) erzeugt und mittels eines Strahlteilers in zwei Teilstrahlen zerlegt, die durch den Lichtwellenleiter geschickt werden. Wird dieser Leiter nun in der Faserspulenebene bewegt, benötigt das Licht in Drehrichtung länger, als gegen die Drehrichtung. Diese Differenz, die Sagnac-Effekt genannt wird, wird gemessen, nachdem die zerlegten Lichtstrahlen am Detektor wieder zusammen geführt wurden.

Die Fehlerquellen dieses Kreisels sind:

- Verformung der Schleife durch Temperaturschwankungen
- beschleunigungsabhängige Terme durch Verformung der Schleife
- Störung der Polarisation durch magnetische Felder

Ring-Laser-Kreisel Eine weitere Verbesserung stellt der Ring-Laser-Kreisel dar. Dieser arbeitet, wie der faseroptische Kreisel, mit dem Sagnac-Effekt. Bei diesem wird ein Glasblock genutzt, in dem Spiegel angebracht sind, die den Laser lenken. Auch hier werden zwei Teilstrahlen erzeugt und die Verschiebung bei einer Drehung des Kreisels gemessen, wodurch die Richtungsänderung des Fahrzeuges bestimmt werden kann.

Piezelektrischer Kreisel Im piezelektrischen Vibrationskreisel wird ein auf Silizium basierender piezelektrischer Kristall genutzt, anstatt einer beweglichen Komponente. Es gibt unterschiedliche Bauformen für diesen Kreisel:

- Zylinder / Weinglas
- Scheiben
- Rechteck
- Dreieck
- Stimmgabel
- Schwingdraht

Das Prinzip des Vibrationskreisels baut auf den Coriolis-Effekt auf. „Wird ein Beschleunigungsmesser mit der Masse m und der Geschwindigkeit v senkrecht zu seiner Messachse y (in x -Richtung) bewegt, so misst er eine Beschleunigung, sofern er eine Drehrate (ω_z) um die Bewegungsachse (x) und Messachse y orthogonal dritte Raumachse erfährt“¹³. Für die Coriolis-Kraft gilt:

$$\vec{F}_c = 2m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (2.1)$$

Mikroelektromechanischer Kreisel Als letzte Möglichkeit für die Lokalisation per Richtungsbestimmung soll in diesem Abschnitt der mikroelektromechanische Kreisel genannt werden. Dieser wird vorrangig aus polykristallinem Silizium (Polysilizium) hergestellt und ist nur wenige Mikrometer groß. Der Coriolis-Effekt wird auch bei diesem Kreisel angewandt. Als Sensor dient jedoch eine oszillierende Polysilizium-Masse im Vakuum auf einer Halbleiterebene. Fehlerquellen können bei diesem Kreisel sein:

- Temperaturänderung

¹³[Lut07], S. 34.

- translatorische Beschleunigung
- Abhängigkeit vom Schwerevektor
- Vibration

2.3 Mathematische Grundlagen

Im letzten Teil des Grundlagenbereichs sollen nun noch, die im späteren Verlauf genutzten, mathematischen Zusammenhänge gezeigt werden. Hierzu zählen unter anderem das Bogenmaß, die trigonometrischen Funktionen Sinus und Kosinus, sowie die Grundlagen der Vektorrechnung.

2.3.1 Vektoren

Seien $\vec{a} = (x_a, y_a)$ und $\vec{b} = (x_b, y_b)$ zwei Vektoren. Dann gilt:¹⁴

$$\vec{a} + \vec{b} = (x_a + x_b, y_a + y_b). \quad (2.2)$$

Für zwei Punkte P und Q ist der Verschiebungsvektor

$$\overrightarrow{PQ} = \vec{Q} - \vec{P} \text{ und } \overrightarrow{QP} = -\overrightarrow{PQ}. \quad (2.3)$$

Durch die Parallelogrammregel (siehe Abbildung 2.6) kann für die Vektoren \vec{R} , \vec{P} und \vec{Q} der folgende Zusammenhang hergestellt werden:

$$\overrightarrow{RP} + \overrightarrow{PQ} = \overrightarrow{RQ}. \quad (2.4)$$

Für den Winkel zwischen zwei Vektoren gilt:

$$\cos(\alpha(\vec{a}, \vec{b})) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}. \quad (2.5)$$

¹⁴vgl. [Str97]

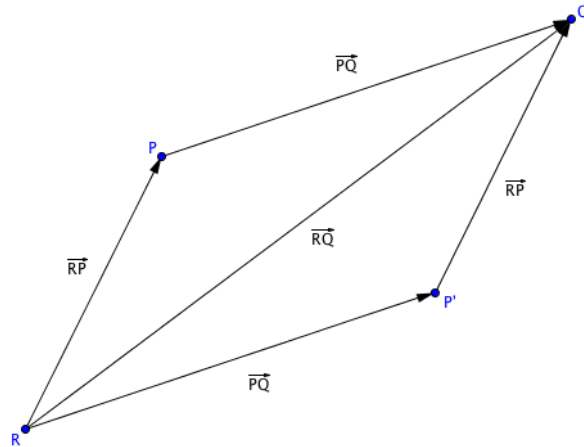


Abbildung 2.6: Parallelogrammregel für Vektoren

Hierbei sind

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = x_a \cdot x_b + y_a \cdot y_b \quad (2.6)$$

das Skalarprodukt der Vektoren \vec{a} und \vec{b} und

$$|\vec{a}| = \sqrt{x_a^2 + y_a^2} \quad (2.7)$$

die Länge des Vektors \vec{a} .

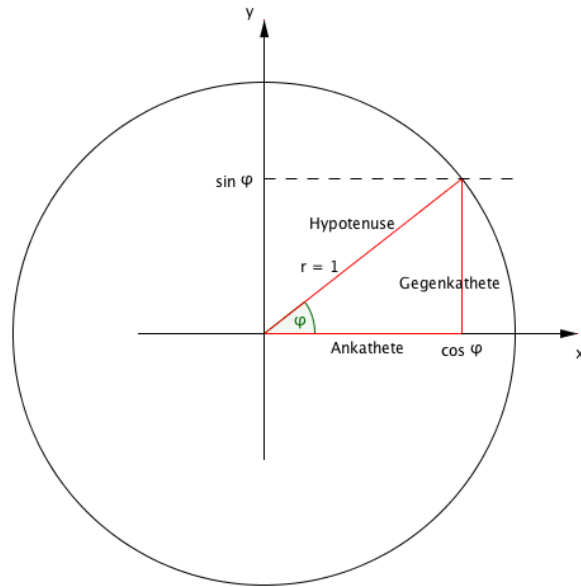
2.3.2 Trigonometrische Funktionen

In einem rechtwinkligen Dreieck lassen sich die Verhältnisse von Ankathete und Gegenkathete zur Hypotenuse durch die trigonometrischen Funktionen beschreiben.¹⁵ Die Relationen werden mit Sinus und Kosinus bezeichnet.

In der Abbildung 2.7 sind diese Seitenverhältnisse dargestellt. Der Sinus eines Winkels ist definiert durch

$$\sin \varphi = \frac{y}{r} = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}} \quad (2.8)$$

¹⁵vgl. [AHK⁺08]

Abbildung 2.7: Sinus und Kosinus eines Winkels aus [AHK⁺08]

und der Kosinus eines Winkels ist durch

$$\cos \varphi = \frac{x}{r} = \frac{\text{Ankathete}}{\text{Hypotenuse}} \quad (2.9)$$

definiert.

2.3.3 Bogenmaß

Eine andere Variante, einen Winkel anzugeben, ist das Bogenmaß.¹⁶ Dabei handelt es sich um eine Maßeinheit, welche sich am Kreisumfang eines Kreises mit dem Radius $r = 1$ orientiert. Somit gibt ein Winkel im Bogenmaß die Länge des Kreisbogenstücks des Einheitskreises an, das ausgeschnitten wird. Für das Bogenmaß gilt also der Zusammenhang zwischen dem Radius r des Kreises und der Bogenlänge l :

$$\varphi = \frac{l}{r}. \quad (2.10)$$

¹⁶vgl. [AHK⁺08]

Die Umrechnung eines Winkels ϕ im Gradmaß in den Winkel φ im Bogenmaß erfolgt durch

$$\varphi = \phi^\circ \frac{\pi}{180^\circ}. \quad (2.11)$$

Kapitel 3

Positionsbestimmung auf Grund der Reifenbewegung

In Kapitel 2.2.3.1 wurde beschrieben, dass der Einsatz von GPS nicht gewährleistet, jederzeit die aktuelle Position innerhalb des globalen Koordinatensystems bestimmen zu können. Wie bereits in der Einleitung beschrieben, sollen die weiteren Möglichkeiten der Positionsbestimmung im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Im Speziellen richtet diese Arbeit ihre Aufmerksamkeit auf die in Kapitel 2.2.4.1.1 und 2.2.4.2.2 beschriebenen Methoden basierend auf der Reifenbewegung eines Fahrzeuges. In diesem Kapitel wird das mathematische Modell für diese Berechnung vorgestellt, das für die Anwendung im nächsten Kapitel entwickelt wurde.

Der erste Abschnitt dieses Kapitels beschäftigt sich mit der Positionsveränderung innerhalb eines aufgezeichneten Zeitintervalls. Im zweiten Abschnitt wird dargestellt, wie auf Grund dieser lokalen Positionsveränderung auf die globale Position geschlossen werden kann. Hierbei wird zwischen der Fahrt entlang einer Geraden und der Fahrt entlang einer Kurve unterschieden. Im abschließenden Abschnitt wird darauf eingegangen, wie die Veränderung der Fahrtrichtung (Heading) zu berechnen ist.

Ziel der Berechnungen ist es, bei einem Ausfall des GPS, weiterhin die Position des Fahrzeuges so genau wie möglich bestimmen zu können. Diese Position muss genutzt werden können, sobald ein Notruf durch das Notrufsystem abgesetzt werden soll.

Für die Berechnungen werden während der Fahrt folgende Daten genutzt:

- Spurweite des Fahrzeuges
- letzte bekannte Position im globalen Koordinatensystem
- Fahrtrichtung im globalen Koordinatensystem vor dem Ausfall von GPS
- Aufzeichnung der Reifendaten

Die Spurweite ist konstant und bereits vor Fahrtantritt bekannt. Die Position im globalen Koordinatensystem wird während der Fahrt mittels GPS bestimmt und ist somit zur weiteren Verwendung bei einem Ausfall des GPS bekannt. Aus diesen Daten kann außerdem die Fahrtrichtung bestimmt werden. Die Bewegung der Reifen wird während der gesamten Fahrt aufgezeichnet. Die Details zur Aufzeichnung der Reifendaten folgen im 4. Kapitel.

Auf Grund dieser Reifendaten sollen die Berechnungen in diesem Kapitel erfolgen, die zu dem in Abbildung 3.1 dargestellten Ergebnis führen, wie etwa der Abbiegewinkel, die Fahrtrichtung und die Position des Fahrzeuges. Das in der Abbildung dargestellte Gesamtbild wird im Folgenden in einzelnen Teilen berechnet und erläutert.

Dafür sind folgende Schritte notwendig:

1. Zerlegung der gesamten Reifendaten in einzelne Intervalle
2. Berechnung der lokalen Positionsveränderung innerhalb eines Intervalls
3. Zusammensetzen aller Einzelintervalle und Einordnen in das globale Koordinatensystem

Für die Darstellungen in diesem Kapitel wird davon ausgegangen, dass die Messdaten der Reifen vorliegen und sich in einzelne Intervalle einteilen lassen. Ausführungen bezüglich der Aufzeichnung und Unterteilung in einzelnen Intervalle sind in Kapitel 4 zu finden. Im nächsten Abschnitt wird zunächst begonnen, nur die Veränderung von einem Messintervall zum nächsten zu beschreiben.

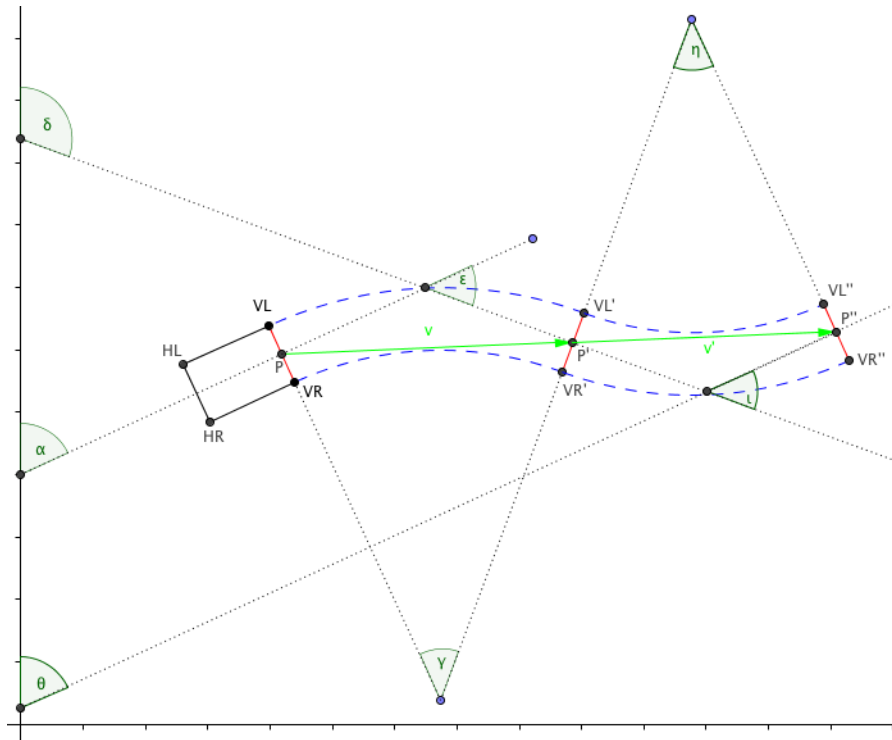


Abbildung 3.1: Gesamtdarstellung zweier Kurven

3.1 Berechnung der Positionsveränderung innerhalb eines Intervalls

Im ersten Schritt der Berechnungen werden nur die lokalen Veränderungen innerhalb eines Intervalls untersucht. Auf Grund der Darstellung der vorliegenden Daten (gefahrte Strecke des linken Reifens und gefahrte Strecke des rechten Reifens), von der bei der Positionsbestimmung ausgegangen wird, ist es nicht möglich, Rückschlüsse daraus zu ziehen, wie der exakte Verlauf innerhalb eines Intervalls ausgesehen hat. Es wird davon ausgegangen, dass immer nur eine Gerade oder eine Kurve gefahren wurde. Nähere Ausführungen hierzu und welche Probleme hierbei entstehen können, erfolgen in Kapitel 4. Im Folgenden wird zunächst nur der theoretische Teil vorgestellt.

Dabei teilt sich die Bestimmung der Positionsveränderung in die beiden oben genannten Abschnitte ein:

1. Positionsveränderung bei gerader Fahrt

2. Positionsveränderung bei einer Kurve

Zunächst wird der einfach zu berechnende Fall einer Geraden vorgestellt. Darauf folgend werden die Berechnungen für eine Kurve ausgeführt. Zunächst seien noch die folgenden Bemerkungen gemacht: Für diese Methode müssen stets der linke und der rechte Reifen der selben Achse miteinander verglichen werden. Außerdem ist es unerheblich welche Achse betrachtet wird. Es genügt, nur eine zu betrachten und die andere, beziehungsweise mehrere Achsen, als zusätzlich Prüfung heran zu ziehen. Details zu den Unterschieden von Vorder- und Hinterachse werden im Rahmen des Prototypen in Kapitel 4 erläutert. Bei der Bestimmung der Positionsveränderung wird ein eindeutiger Punkt am Fahrzeug festgelegt. Die Wahl des Punktes ist frei, sie muss jedoch dann beibehalten werden. Wie im weiteren Verlauf dargestellt wird, bietet sich die Mitte der für die Berechnung heran gezogenen Fahrzeugachse an.

3.1.1 Fahrt entlang einer Geraden

Der einfachste Fall der Positionsveränderung verläuft entlang einer Geraden. In Abbildung 3.2 ist dieser Fall dargestellt. Wie auch im weiteren Verlauf des Kapitels wird hier exemplarisch die Vorderachse genutzt. Entsprechend ist VL der vordere, linke Reifen und VR der vordere, rechte Reifen sowie s_L und s_R die Spuren der beiden Reifen. Weiterhin ist P die alte Position und P' die neue Position des Fahrzeuges, bzw. VL' und VR' die neuen Positionen der beiden Reifen.

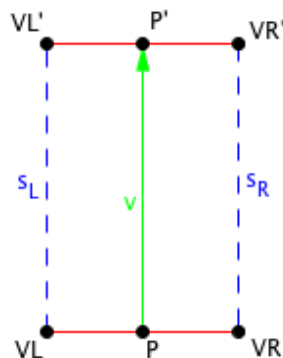


Abbildung 3.2: Positionsveränderung bei gerader Fahrt

Da die Fahrtrichtung beibehalten wird, bedeutet dies, dass $s_L = s_R$ gilt. Geht man nun davon aus, dass die Vorderachse in einem kartesischen Koordinatensystem auf der x-Achse und der Punkt P im Ursprung liegt, bedeutet dies, dass sich der Verschiebungsvektor \vec{v} zu

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ |s_L| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ |s_R| \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

innerhalb dieses Intervalls ergibt.

Zusammen mit der im nächsten Abschnitt dargestellten Betrachtung einer Kurve wird in Kapitel 3.2 beschrieben, wie dieser Verschiebungsvektor \vec{v} im globalen Koordinatensystem einzuordnen ist.

3.1.2 Fahrt entlang einer Kurve

Der zweite mögliche Fall der Positionsveränderung eine Kurvenfahrt. Wie bereits erläutert, muss angenommen werden, dass entweder in einem Intervall entlang einer Geraden oder einer Kurve gefahren wird. Dabei beschreibt diese Kurve einen Kreisbogen, wie er in Abbildung 3.3 zu sehen ist.

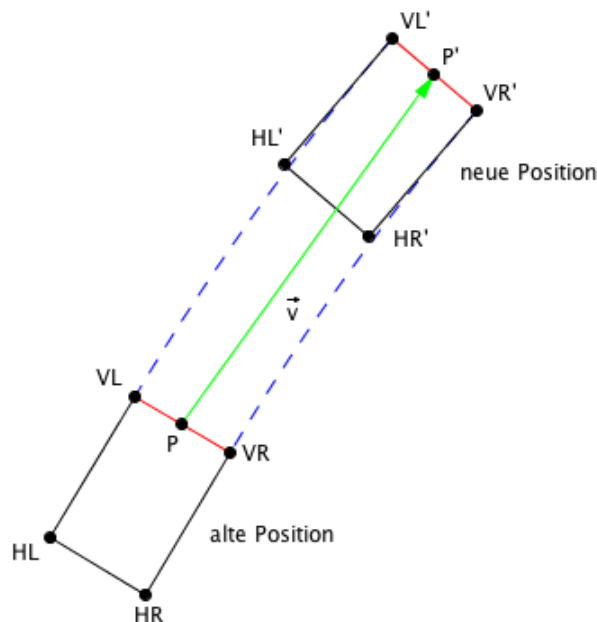


Abbildung 3.3: Alte und neue Position eines abbiegenden Fahrzeuges

In dieser Abbildung sind die vier Reifen in ihrer alten und der neuen Position zu sehen. Die gestrichelte Linie stellt die Spur der Vorderachse dar, die für die Berechnungen genutzt wird. Neben der Spurweite, also die Entfernung zwischen VL und VR , ist die Länge dieser Spuren bekannt. Mit diesen beiden Werten können die notwendigen Daten für die Bestimmung der neuen Position ermittelt werden.

Die für die Bestimmung der neuen, globalen Position notwendige Variable ist der Verschiebungsvektor \vec{v} in der Abbildung 3.3, der von der alten Position zur neuen Position zeigt. Wie bereits erwähnt, ist es irrelevant, welcher Punkt berechnet wird. Wie in der späteren Rechnung deutlich wird, bietet sich der Mittelpunkt der betrachteten Achse an.

Zunächst soll die lokale Veränderung der Position bestimmt werden. Betrachtet man nur noch die Fahrzeugachse und die beschriebene Kurve, lässt sich Abbildung 3.3 auf Abbildung 3.4 reduzieren. Hierbei können Links- und Rechtskurven gleich behandelt werden, da durch die Wahl der Position der Fahrzeugachse und des Punktes P im kartesischen Koordinatensystem die Linkskurve zur Rechtskurve achsensymmetrisch ist.

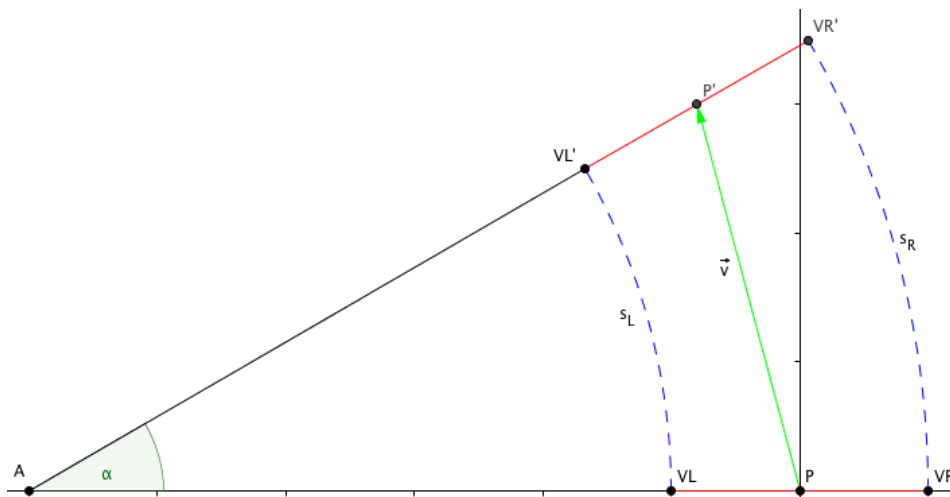


Abbildung 3.4: Kurve im Koordinatensystem

3.1.2.1 Berechnung des Verschiebungsvektors \vec{v}

Der Vektor \vec{v} lässt sich beschreiben als

$$\vec{v} = \overrightarrow{PP'} = \vec{P}' - \vec{P}. \quad (3.2)$$

Hierbei wurden die Punkte P und P' jeweils in der Mitte der Fahrzeugachse gewählt. Da der Punkt P so gewählt wurde, dass er im Ursprung liegt, ist

$$\vec{v} = \vec{P}'. \quad (3.3)$$

Der Vektor \vec{P}' kann in Abhängigkeit der Vektoren $\overrightarrow{VL'}$ und $\overrightarrow{VR'}$ beschrieben werden. Es gilt

$$\vec{P}' = \overrightarrow{VL'} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{VL'VR'} = \overrightarrow{VL'} + \frac{1}{2} \cdot (\overrightarrow{VR'} - \overrightarrow{VL'}), \quad (3.4)$$

was sich mit zwei weiteren Zwischenschritten zu

$$\vec{P}' = \overrightarrow{VL'} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{VR'} - \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{VL'} = \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{VL'} + \frac{1}{2} \cdot \overrightarrow{VR'} = \frac{1}{2} \cdot (\overrightarrow{VL'} + \overrightarrow{VR'}) \quad (3.5)$$

vereinfachen lässt. Die hierfür notwendigen Vektoren $\overrightarrow{VL'}$ und $\overrightarrow{VR'}$, bzw. die Koordinaten der entsprechenden Punkte VL' und VR' lassen sich mittels der trigonometrischen Funktionen Sinus und Kosinus beschreiben. Zunächst ist hierfür der Winkel α notwendig.

3.1.2.2 Berechnung des Abbiegewinkels α

Im Bogenmaß gilt

$$\alpha = \frac{s_L}{AVL} \quad \text{und} \quad \alpha = \frac{s_R}{AVR}. \quad (3.6)$$

Mit

$$\overline{AVR} = \overline{AVL} + \overline{VLVR} \quad (3.7)$$

lassen sich die beiden Zusammenhänge aus Gleichung 3.6 zu

$$\frac{s_L}{\overline{AVL}} = \frac{s_R}{\overline{AVL} + \overline{VLVR}} \quad (3.8)$$

zusammen fassen. Hierin sind s_L , s_R , sowie \overline{VLVR} bekannt, sodass \overline{AVL} als einzige Variable verbleibt, nach der aufgelöst wird. Zur besseren Lesbarkeit seien hierbei die Spurbreite $\overline{VLVR} = b$ und der Kurvenradius $\overline{AVL} = a$. Dann ist

$$\begin{aligned} \frac{s_R}{a+s} = \frac{s_L}{a} &\Leftrightarrow \frac{s_R}{s_L} = \frac{a+s}{a} \Leftrightarrow \frac{a}{a} + \frac{s}{a} = \frac{s_R}{s_L} \\ \Leftrightarrow 1 + \frac{s}{a} = \frac{s_R}{s_L} &\Leftrightarrow \frac{1}{a} = \frac{\frac{s_R}{s_L} - 1}{s} \Leftrightarrow a = \frac{s}{\frac{s_R}{s_L} - 1}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Dies kann durch eine weitere Umformung vereinfacht werden

$$a = \frac{s}{\frac{s_R}{s_L} - \frac{s_L}{s_L}} = \frac{s}{\frac{s_R - s_L}{s_L}} = \frac{s \cdot s_L}{s_R - s_L}. \quad (3.10)$$

Das Ergebnis aus Gleichung 3.10 kann nun wiederum in Gleichung 3.6 für \overline{AVL} eingesetzt werden, womit man

$$\alpha = \frac{s_L}{\frac{s \cdot s_L}{s_R - s_L}} = \frac{s_L \cdot (s_R - s_L)}{s \cdot s_L} = \frac{s_R - s_L}{s} \quad (3.11)$$

erhält.

3.1.2.3 Ableitung der neuen Position basierend auf den voran gegangenen Daten

Im nächsten Schritt können nun die Koordinaten der Punkte VL' und VR' durch Sinus und Kosinus bestimmt werden, unter Beachtung der in Abbildung 3.5 eingezeichneten Hilfsdreiecke.

Seien

$$\vec{VL}' = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{VR}' = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

dann gilt:

$$\begin{aligned} x_1 &= -\overline{0VL} - \overline{AVL} + \overline{AVL} \cdot \cos \alpha \\ y_1 &= \overline{AVL} \cdot \sin \alpha \\ x_2 &= -\overline{0VL} - \overline{AVL} + \overline{AVR} \cdot \cos \alpha \\ y_2 &= \overline{AVR} \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Hierbei sind

$$\overline{AVR}' = \overline{AVR}, \text{ und } \overline{AVL}' = \overline{AVL}. \quad (3.14)$$

Nun kann der in Gleichung 3.5 dargestellte Zusammenhang genutzt werden, um den Vektor \vec{v} für eine Kurve zu berechnen. Aus diesem Vektor geht jedoch noch nicht die endgültige Position und der endgültige Abbiegewinkel hervor, da es sich dabei nicht um den Winkel zwischen dem Vektor \vec{v} und der x-Achse handelt. Wie dieser Abbiegewinkel und damit das neue Heading zu bestimmen ist und wie mittels dem Vektor \vec{v} die neue globale Position bestimmt werden kann, soll nun geklärt werden.

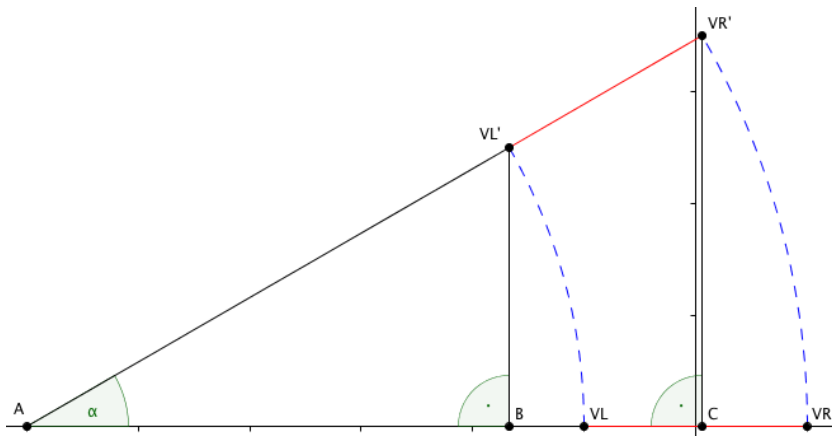


Abbildung 3.5: Hilfsdreiecke zur Berechnung durch Sinus und Kosinus

Der Vektor \vec{v} ist zunächst um diesen Winkel zu drehen, um den korrekten Vektor zu erhalten, wie er in Abbildung 3.6 zu sehen ist. Für diese Drehung wird die Drehmatrix im euklidischen Raum genutzt:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda \\ \sin \lambda & \cos \lambda \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

Es ist zu beachten, dass die mathematisch positive Drehung gegen den Uhrzeigersinn erfolgt. Der in Abbildung 3.6 zu sehende Winkel λ ist also negativ. Alternativ kann der überstumpfe Winkel $\tilde{\lambda} = 360^\circ - \lambda$ genutzt werden, was zum gleichen Ergebnis führt, da für das Ergebnis die Richtung der Drehung nicht relevant ist. Diese Drehung ist im Detail in Abbildung 3.7 zu sehen.

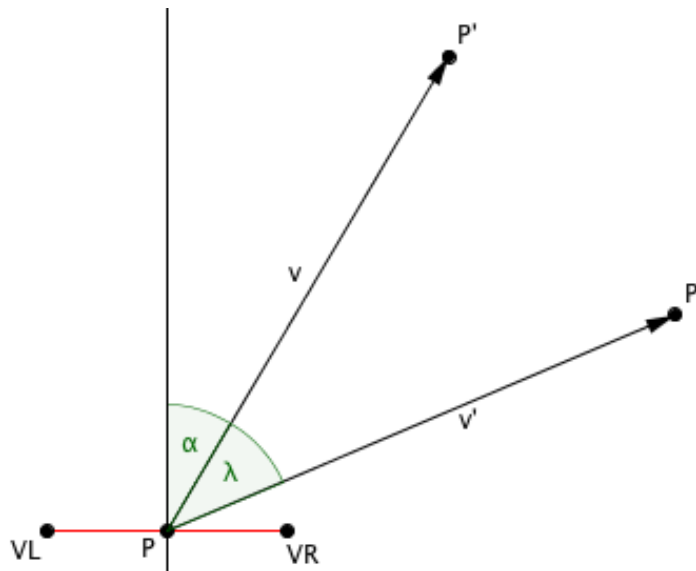


Abbildung 3.7: Drehung des Vektors \vec{v}

Hierbei ist \vec{v} der im vorherigen Abschnitt berechnete Vektor, der zur x-Achse um den Winkel α verdreht ist. Dieser muss, wie oben beschrieben, nun um den Winkel λ gedreht werden.

Dieser neue Vektor \vec{v}' kann nun an die alte Position P im globalen Koordinatensystem angesetzt werden. Der Vektor zeigt dann auf die neue Position des Fahrzeuges nach diesem Intervall.

Im letzten Teil der Berechnung muss nun das neue Heading berechnet werden, was nicht identisch zum Winkel zwischen der x-Achse und der Vektor \vec{v} ist. Es handelt sich dabei um den in Abbildung 3.6 gezeigten Winkel λ' .

3.3 Veränderung der Fahrtrichtung während eines Intervalls

Der letzte Teil bei der Berechnung der Positionsveränderung besteht darin, das neue Heading λ' zu berechnen, also die Richtung, in die sich das Fahrzeug nach der Kurve bewegt. Dieser Winkel ist nicht identisch mit dem Winkel zwischen der x-Achse und dem Vektor \vec{v} .

Eine Änderung des Headings λ tritt nur bei einer Kurve auf. Für eine Gerade bedeutet dies direkt:

$$\lambda' = \lambda. \quad (3.16)$$

In Abbildung 3.8 sind die für die Berechnung des neuen Headings notwendigen Winkel angegeben. Das Heading in Punkt P verläuft parallel zum Vektor \overrightarrow{BD} und im Punkt P' parallel zum Vektor \overrightarrow{BC} . Daraus ergibt sich die Änderung des Headings λ , also der Abbiegewinkel, als Winkel zwischen diesen beiden Vektoren.

Der Winkel, der von zwei Vektoren eingeschlossen wird, kann mittels Skalarprodukt wie folgt ausgedrückt werden:

$$\cos \varphi = \frac{|\vec{a} \cdot \vec{b}|}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}. \quad (3.17)$$

Beachtet man jedoch das rechtwinklige Dreieck mit den Eckpunkten A , B und C , in dem der Winkel α durch die Berechnungen in Kapitel 3.1.2 bereits bekannt ist, ergibt sich zunächst, dass durch die Winkelsumme in einem Dreieck gilt

$$\alpha + \delta = 90^\circ \Leftrightarrow \delta = 90^\circ - \alpha. \quad (3.18)$$

Mit diesem Heading ist das Modell für die Berechnung der neuen Position abgeschlossen. Alle bereits in Abbildung 3.1 vorgestellten Variablen sind damit bestimmt.

Dieses Kapitel bildet damit das Fundament der Arbeit, mit dem in Kapitel 4 auf den praktischen Einsatz eingegangen werden soll. Dort wird der Prototyp vorgestellt, dessen Design und die Ziele, die damit verfolgt werden.

Kapitel 4

Prototyp

In Kapitel 3 wurde gezeigt, wie die Positionsveränderung eines Fahrzeuges nur auf Grund der Reifenbewegung berechnet werden kann. Dieser theoretische Teil der Arbeit soll nun durch den entwickelten Prototypen vertieft werden und wird in diesem Kapitel vorgestellt.

Um das mathematische Modell zu verifizieren, wurde ein Prototyp entwickelt, der aus aufgezeichneten Daten die gefahrene Strecke berechnen soll. Hieraus soll erkennbar sein, ob die Positionsbestimmung mittels Reifenbewegung geeignet ist für den praktischen Einsatz in Notrufsystemen. In Abschnitt 4.2 soll zunächst das Design des Prototypen vorgestellt werden, bevor in Abschnitt 4.2.3 die eigentliche Berechnung erläutert wird.

Zu Beginn wird in diesem Kapitel vorgestellt, welches Ziel mit dem Prototyp verfolgt wurde und welche Ergebnisse zu erwarten sind. Anschließend wird der Prototyp vorgestellt. Das Design umfasst das Auslesen der Daten, die Berechnung der Position und die Rekonstruktion der gefahrenen Strecke. Diesem Teil folgt die Vorstellung der Ergebnisse, die mittels Odometrie und den vorhandenen Reifendaten erzielt werden können.

Im Anschluss werden Probleme vorgestellt, die bei der Aufzeichnung und Berechnung der Daten auftreten können. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, diese Probleme zu minimieren.

4.1 Ziele des Prototypen

Bei der Erstellung eines Prototypen wurden hauptsächlich zwei Ziele verfolgt:

1. Verifikation der in Kapitel 3 dargestellten Berechnungen
2. Test mit unter realen Bedingungen aufgezeichneten Daten

Das erste Ziel des Prototypen ist die Verifikation. In Kapitel 3 wurde vorgestellt, wie aus der Reifenbewegung die Positionsveränderung eines Fahrzeuges berechnet werden kann und wie daraus auf dessen globale Position zu schließen ist. Diese Berechnungen sollten anhand vorgefertigter Beispiele am Prototypen getestet werden, um die Richtigkeit der Berechnungen sicher zu stellen.

Im zweiten Schritt werden echte Reifendaten genutzt, die während einer Testfahrt aufgezeichnet wurden. Anhand dieser Daten soll berechnet werden, wie sich das aufgezeichnete Fahrzeug wirklich bewegt hat. Diese berechnete Strecke wird mit der tatsächlich gefahrenen Strecke verglichen.

Um diese Ziele zu erreichen, sollen als Ergebnis dieser Arbeit Aussagen darüber gemacht werden können, wie genau und wie brauchbar die Odometrie ist. Daraus soll geschlossen werden, ob eCall als temporärer Ersatz beim Ausfall der Positionsbestimmung per GPS genutzt werden kann.

Hierbei ist besonders wichtig, Fehlerquellen zu identifizieren und Ansätze zu ihrer Minimierung zu finden. Im Zentrum der Untersuchung steht die Abweichung der berechneten Strecke von der tatsächlich gefahrenen Strecke.

Der Prototyp ist nicht geeignet, direkt in eCall eingebettet zu werden. Es soll grundsätzlich getestet werden, ob die in dieser Arbeit vorgestellte Methode eine brauchbare Verbesserung bietet. Hierzu wird zunächst im folgenden Abschnitt auf das Design des Prototypen eingegangen.

4.2 Design des Prototypen

In diesem Abschnitt werden die Bestandteile des Prototypen vorgestellt. Zunächst wird eine Übersicht über dessen drei Bestandteile gegeben. Anschließend werden diese drei Teile, soweit für diese Arbeit nötig, im Detail vorgestellt.

4.2.1 Übersicht

Der Prototyp setzt sich aus diesen drei Bestandteilen zusammen:

- Auslesen der Reifendaten
- Auswertung der Reifendaten
- Rekonstruktion der Strecke

Diese drei Bestandteile, wie sie auch in Abbildung 4.1 zu sehen sind, sollen in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Dabei wird zunächst gezeigt, wie eine typische Ausgabe der durch Reifensensoren gemessenen Werte aussehen kann. Anschließend wird auf die Positionsveränderung und letztendlich auf die Streckenrekonstruktion eingegangen, da hiermit der Vergleich der errechneten Strecke mit der tatsächlichen Strecke durchgeführt werden kann.

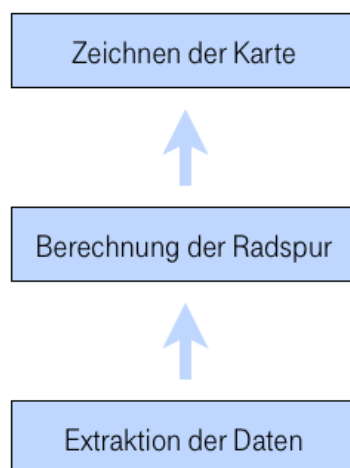


Abbildung 4.1: Bestandteile des erarbeiteten Prototypen

Bei der Beschreibung des Prototypen stehen die implementierungsspezifischen Details, die hierbei zu beachten sind, im Vordergrund.

4.2.2 Auslesen der Reifendaten

Neben den bekannten Größen, wie etwa die Spurbreite, müssen die Reifenpulse erst ausgelesen werden. Die aufgezeichneten Reifendaten liegen in einem einfachen Textformat vor. Ein Ausschnitt einer solchen Logdatei ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

```
465.704380 2F EC 2E 2A 20 E8 21 AA
465.744440 30 00 2E 3D 20 FC 21 BE
465.784400 30 13 2E 51 21 10 21 D1
465.824410 30 27 2E 65 21 24 21 E5
465.864430 30 3B 2E 79 21 37 21 F9
```

Abbildung 4.2: Beispiel einer Logdatei

In dieser Logdatei sind folgende Daten enthalten:

- Zeitstempel seit Start der Aufzeichnung (in Sekunden)
- Zählwert: Reifen vorne links (2 Spalten)
- Zählwert: Reifen vorne rechts (2 Spalten)
- Zählwert: Reifen hinten links (2 Spalten)
- Zählwert: Reifen hinten rechts (2 Spalten)

Für jeden Reifen stehen also acht Byte zur Verfügung, die durch vier Hexadezimal-Werte repräsentiert werden. Die Codierung dieser Blöcke ist wie folgt:

- Bit 0: gesetzt, falls ein Fehler vorliegt
- Bit 1 bis 15: Zählwert für die Reifenpulse

Die Zähler können also maximal $7FFF_{16} = 32767_{10}$ Pulse zählen. Anschließend wird der Zähler auf 0000_{16} zurück gesetzt. Es handelt sich hierbei also um einen absoluten Zähler. Das erste Bit wird als Fehlerindikator genutzt, welches einen Fehler bei der Messung zu diesem Zeitpunkt anzeigt.

Der erste Teil des Prototypen besteht also aus zwei Abschnitten:

1. Berechnung der Pulse in einem Intervall
2. Rekonstruktion der gefahrenen Strecke auf Grund der Anzahl der Pulse

4.2.2.1 Bildung einzelner Intervalle

Für den ersten Punkt muss lediglich die Differenz gebildet werden. Sei $p_{int}(xy, i)$ die Anzahl der Pulse des Reifens xy im Intervall (timeslot) i . Der Index xy gibt hierbei den entsprechenden Reifen an:

- vorne links: vl
- vorne rechts: vr
- hinten links: hl
- hinten rechts: hr

Sei $p_{abs}(xy, i)$ der aktuelle Stand des absoluten Pulszählers nach dem Aufzeichnungspunkt t_i , also für das Intervall i . Dann gilt für diese Intervalle:

$$p_{int}(xy, i) = p_{abs}(xy, i + 1) - p_{abs}(xy, i). \quad (4.1)$$

Weiterhin muss die exakte Dauer der Intervalle bestimmt werden. Die Aufzeichnungsfrequenz ist zwar mit $f = 50Hz$ konstant gewählt, jedoch gibt es bei der Aufzeichnung oft eine geringe Verzögerung, so dass die Intervalle nicht immer eine Länge von $20ms$ haben. Ähnlich der Differenzbildung bei den Pulsen wurde bei den Intervalllängen vorgegangen. Im Intervall i gilt dann für die Dauer der Intervalls $t_{int}(i)$ in Bezug zu den Absolutwerten $t_{abs}(i + 1)$ und $t_{abs}(i)$ des Zeitgebers

$$t_{int}(i) = t_{abs}(i + 1) - t_{abs}(i). \quad (4.2)$$

4.2.2.2 Rekonstruktion der gefahrenen Strecke aus den Pulsdaten

Im zweiten Schritt muss aus den errechneten Pulsdifferenzen nun noch die gefahrene Strecke der Reifen $s_{int}(xy, i)$ rekonstruiert werden. Mit dem Umfang des Reifens U_{xy} und der Anzahl der Pulse pro Umdrehung (Messpunkte) m gilt dann

$$s_{int}(xy, i) = m \cdot \frac{U_{xy}}{p_{int}(xy, i)} \quad (4.3)$$

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Tests wurde davon ausgegangen, dass

$$U_{vl} = U_{vr} = U_{hl} = U_{hr} \quad (4.4)$$

gilt.

Näheres zur Bestimmung der Reifenumfänge und zu den bei unterschiedlichen Reifenumfängen entstehenden Problemen, werden in Punkt 5.2.2.1 dargestellt. Dort wird außerdem darauf eingegangen, wie sich Intervalle unterschiedlicher Größe im Ergebnis ausprägen. In Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass die Aufzeichnung mit der Frequenz $f \simeq 50Hz$ erfolgte. Weitere Ausführungen zur Intervallbetrachtung gibt es im Punkt 5.1.

4.2.3 Auswertung der Reifendaten

Nach dem Auslesen der Reifendaten und der Rekonstruktion der gefahrenen Strecke, wird in diesem Abschnitt kurz auf die Bestimmung weiterer relevanter Werte eingegangen. Für die Berechnungsgrundlage müssen folgende Werte bekannt sein:

- Radpulse pro Messintervall
- Anzahl der Radpulse pro Umdrehung eines Reifens
- Spurweite des Fahrzeuges
- Umfang der Reifen

Die Anzahl der Radpulse pro Umdrehung ist bekannt und für jedes Fahrzeug konstant. Die Spurweite eines Fahrzeuges wird von der Mitte des linken Reifens zur Mitte des rechten Reifens gemessen. Hierbei handelt es sich nicht um eine Konstante, da ein Wechsel zu

breiteren oder schmalere Reifen zu einer Veränderung der Spurweite führt. Bei den Tests der Reifendaten konnte festgestellt werden, dass sich Fehler bei der Spurweite deutlich geringer auswirken, als Fehler beim Reifenumfang oder der Anzahl der Reifenpulse pro Umdrehung.

Die letzte Variable ist der Reifenumfang. Der Wechsel der Reifen oder die Erwärmung der Reifen während der Fahrt können Gründe sein, die zu einer Veränderung des Reifenumfangs führen. Diese Veränderungen müssen bestimmt werden. Näheres hierzu wird in Punkt 5.2.2.1 erläutert. Für die beiden letztgenannten Variablen kann als erste Näherung ein Referenz-Wert genutzt werden, sofern keine exakten Werte vorhanden sind.

4.2.4 Rekonstruktion des zurückgelegten Weges

Der letzte und abschließende Schritt bei der Erstellung des Prototypen, ist die Rekonstruktion der Strecke. Diese kann dann mit der tatsächlich gefahrenen Strecke verglichen werden, um Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit der Odometrie geben zu können. In diesem Abschnitt wird die Methodik dargestellt, während Kapitel 6 auf die erzielten Ergebnisse und deren Bewertung eingeht.

Für die spätere Auswertung wurde das Programm Mathematica in der Version 7.0.1 genutzt. Als Ergebnis dieses Abschnitts muss ein Ergebnis stehen, mit dem in Mathematica weiter gearbeitet werden kann. Für die Ausgabe kann dort ein *List-Plot* genutzt werden, mit dem es möglich ist, x- und y-Koordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem einzuzeichnen. Die Syntax für diesen Befehl ist:

$$ListPlot[\{\{x_0, y_0\}, \{x_1, y_1\}, \dots, \{x_n, y_n\}\}] \quad (4.5)$$

Die Koordinaten der einzelnen Punkte müssen hierfür berechnet werden. Im vorherigen Abschnitt wurden nur die Veränderungen durch die Verschiebungsvektoren \vec{v} berechnet. Diese müssen nun aneinander gereiht werden, um die absoluten Positionen im globalen Koordinatensystem zu erhalten. Sei $P_{abs,i}$ diese Position nach dem Intervall i und \vec{v}_i die

einzelnen Verschiebungsvektoren in den Teilabschnitten, wie sie in Kapitel 3 dargestellt wurden, dann gilt

$$P_{abs,i} = \sum_{i=0}^i \vec{v}_i. \quad (4.6)$$

Für die Darstellung müssen nun diese errechneten Punkte in Gleichung 4.5 eingesetzt werden, wodurch sich

$$ListPlot[\{\{x(P_{abs,0}), y(P_{abs,0})\}, \{x(P_{abs,1}), y(P_{abs,1})\}, \dots, \{x(P_{abs,n}), y(P_{abs,n})\}\}] \quad (4.7)$$

ergibt. Mit diesem Ergebnis wurde dann abschließend Mathematica zur Visualisierung und für weitere Berechnungen genutzt. Dies wird in Punkt 6.2 vertieft.

4.2.5 Verifikation des mathematischen Modells

Durch den vorgestellten Prototypen soll nun zunächst anhand einer Beispielstrecke das erstellte Modell verifiziert und die Anwendung demonstriert werden. Dieses Beispiel ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

Dabei seien die Daten gegeben, wie sie in Tabelle 4.1 dargestellt sind. Weiterhin sei die Spurweite $s = 2m$ in diesem Beispiel.

	Intervalle				
	0	1	2	3	4
vorne links	10	$\pi/2$	5	$3\pi/2$	10
vorne rechts	10	$3\pi/2$	5	$\pi/2$	10

Tabelle 4.1: Beispieldaten für den Test des Prototypen

Mit der in Kapitel 3 dargestellten Methode können aus diesen Werten nun die Vektoren der einzelnen Abschnitte berechnet werden. In der folgenden Rechnung sei dies beispielhaft für den zweiten Abschnitt dargestellt:

Seien s_R und s_L die Spuren des rechten und des linken Reifens, s die Spurweite, α der Abbiegewinkel, a der Kurvenradius \overline{AVL} und b die Spurweite \overline{AVR} , dann gilt:

$$\alpha = \frac{s_R - s_L}{s} = \frac{\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{2}}{2} = \frac{2\pi}{2} = \frac{\pi}{2}, \quad (4.8)$$

$$a = \frac{s \cdot s_L}{s_R - s_L} = \frac{2 \cdot \frac{\pi}{2}}{\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{2}} = \frac{\pi}{2\pi} = \frac{\pi}{\pi} = 1, \quad (4.9)$$

$$b = \overline{AVL} + s = a + s = 1 + 2 = 3. \quad (4.10)$$

Daraus ergeben sich die neuen Positionen $\overrightarrow{VL'} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$ und $\overrightarrow{VR'} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$ der Reifen zu

$$\begin{aligned} x_1 &= -\overline{0VL} - \overline{AVL} + \overline{AVL} \cdot \cos \alpha = -\frac{s}{2} - a - a \cdot \cos \alpha \\ &= -\frac{2}{2} - 1 - 1 \cdot \cos \frac{\pi}{2} = -1 - 1 - 1 \cdot 0 = -2, \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} y_1 &= \overline{AVL} \cdot \sin \alpha = a \cdot \sin \alpha \\ &= 1 \cdot \sin \frac{\pi}{2} = 1, \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= -\overline{0VL} - \overline{AVL} + \overline{AVR} \cdot \cos \alpha = -\frac{s}{2} - a - b \cdot \cos \alpha \\ &= -\frac{2}{2} - 1 - 3 \cdot \cos \frac{\pi}{2} = -1 - 1 - 0 = -2 \text{ und} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} y_2 &= \overline{AVR} \cdot \sin \alpha = b \cdot \sin \alpha \\ &= 3 \cdot \sin \frac{\pi}{2} = 3 \cdot 1 = 3 \end{aligned} \quad (4.14)$$

und damit letztendlich die neue Position P'

$$P' = \frac{1}{2} \cdot (\overrightarrow{VL'} + \overrightarrow{VR'}) = \frac{1}{2} \cdot \left(\begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \end{pmatrix} \right) = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} -4 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

Für die einzelnen Vektoren \vec{v}_i gilt:

$$\vec{v}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \end{pmatrix}, \vec{v}_1 = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}, \vec{v}_2 = \begin{pmatrix} -5 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{v}_3 = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{v}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \end{pmatrix}. \quad (4.16)$$

Insgesamt ergibt sich damit der resultierende Vektor \vec{v} , der vom Startpunkt zum Zielpunkt zeigt gemäß Gleichung 4.6 zu

$$\vec{v} = \sum_{i=0}^4 \vec{v}_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -5 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -9 \\ 24 \end{pmatrix}. \quad (4.17)$$

Werden diese Testdaten dem Prototypen übergeben, liefert dieser das in Abbildung 4.3 dargestellte Ergebnis, in dem die Endposition dem berechneten Vektor \vec{v} entspricht. Die entsprechende Ausgabe ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Zunächst müssen noch die Vektoren in den lokalen Koordinatensystemen des jeweiligen Intervalls bestimmt werden. Außerdem deren Winkel und die Länge. Anschließend erhält man die Position im globalen Koordinatensystem.

Ungedrehte Vektoren:

```
i = 0 -> vector: (0/10), angle: 0, length: 10
i = 1 -> vector: (-2/2), angle: 1.5708, length: 2.82843
i = 2 -> vector: (0/5), angle: 0, length: 5
i = 3 -> vector: (2/2), angle: -1.5708, length: 2.82843
i = 4 -> vector: (0/10), angle: 0, length: 10
i = 5 -> vector: (0/0), angle: 0, length: 0
```

```
globalPosition(i=0): (0/0)
globalPosition(i=1): (0/10)
globalPosition(i=2): (-2/12)
globalPosition(i=3): (-7/12)
globalPosition(i=4): (-9/14)
globalPosition(i=5): (-9/24)
```

Abbildung 4.4: Ausgabe für die erstellten Beispieldaten

In dieser Ausgabe sind zunächst die Vektoren, bezogen auf die lokalen Koordinatensysteme, gezeigt. Diese sind zunächst noch nicht an der wirklichen Fahrtrichtung des Fahrzeugs ausgerichtet und daher noch ungedreht.

Wie aus der Ausgabe des Prototypen zu erkennen ist, stimmt die Position des Fahrzeugs am Ende mit dem errechneten Ergebnis überein. In beiden Fällen befindet sich das Ziel im Punkt $P_5 = \begin{pmatrix} -9 \\ 24 \end{pmatrix}$.

Im nächsten Kapitel wird auf die Probleme eingegangen, die bei der Anwendung des Prototypen auf die Reifendaten entstehen. Daran anschließend werden die erzielten Ergebnisse und deren Auswertung in Kapitel 6 gezeigt.

Kapitel 5

Probleme bei der Berechnung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Problemen, die bei der Messung durch die Odometrie auftreten können. Hierzu gehören Fehler, die bereits bei der Messung auftreten, während der Fahrt oder in der späteren Berechnung.

Bei der Auswertung der Daten ergeben sich Fehlerquellen. Diese Fehler lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen:

- systematische Fehler
- nicht-systematische (zufällige) Fehler

Systematische Fehler treten bei der Wiederholung einer Messung stets in gleicher Ausprägung auf. Daher können sie bei wiederholter Auswertung nicht erkannt oder vermieden werden. Sind diese Fehler bekannt, bedeutet dies, dass durch Vorkehrungen, wie etwa einer Vorverarbeitung der Daten, diese Fehler berücksichtigt und korrigiert werden können. Beschreibungen hierzu finden sich unter anderem in Punkt 6.2.

Systematische Fehler können folgende Ursachen haben¹:

- Verwendung falscher Messinstrumente
- falsche elektrische Schaltung
- Alterung der Messgeräte

¹vgl. [TS]

- Unvollkommenheit des Messgegenstandes (Inhomogenität, Mangel an Reinheit)
- Überschreiten der Gültigkeitsgrenzen physikalischer Gesetze
- äußere Einflüsse (Temperatur, Störfelder)

Nicht-systematische Fehler treten hingegen zufällig auf. Bei mehrfacher Messung treten sie nicht in gleicher Ausprägung auf, gehorchen jedoch den Gesetzen der Statistik. Ursachen für diese Klasse der Fehler können beispielsweise sein²:

- Rauschen, Fluktuationen
- zufällig und unvorhersehbare äußere Einflüsse
- endliches Auflösungsvermögen der Messanordnung
- die Reibung in einem Messinstrument
- Schätzungen und Interpolationen auf Messskalen

In den folgenden Unterabschnitten sollen die speziell bei der Odometrie festgestellten Fehler diskutiert werden. Im anschließenden Kapitel werden Methoden vorgestellt, um diese Fehler zu minimieren.

5.1 Details zum Odometer

In diesem Abschnitt wird zunächst ein Odometer im Detail erläutert, um daran in den nächsten Abschnitten zu zeigen, welche Fehler bei der Messung durch ein solches Instrument auftreten können. Im Grundlagenteil wurde das Odometer bereits vorgestellt. Dieser Abschnitt soll eine Übersicht über die Arbeitsweise eines solchen Gerätes dienen.

Eine Variante, wie die Odometrie verwirklicht werden kann, ist eine photoelektrische Abtastung, wie sie in Abbildung 5.1³ zu sehen ist. Anhand dieser Abbildung ist auch direkt das Problem zu erkennen. Durch eine Lichtquelle wird ein Lichtstrahl ausgesandt, welcher auf der anderen Seite der rotierenden Scheibe durch ein Photoelement registriert wird. Es werden also nicht konkrete Strecken gemessen, sondern jeder Strich repräsentiert

²vgl. [TS]

³Abbildung aus: http://pics.computerbase.de/lexikon/185535/150px-Inkrementalgeber_mit_gabellichtschranke.JPG

auf der Scheibe einen Anteil am vollen Umfang. Sei n die Anzahl der Striche auf der Scheibe, dann bedeutet jeder gemessene Strich, dass $\frac{1}{n}$ des Umfangs weiter gedreht wurde.

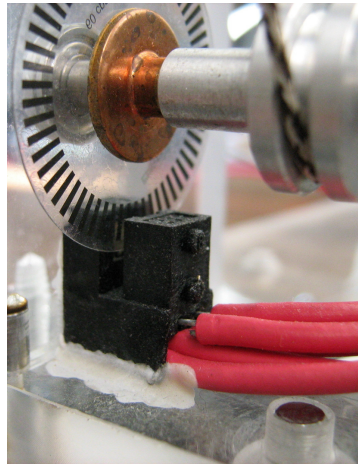


Abbildung 5.1: Photoelektrische Abtastung (Inkrementalgeber)

Aus den vorliegenden Testdaten ergeben sich zwei Probleme:

- begrenzte Auflösung
- begrenzte Aufzeichnungsfrequenz

Durch die mit Strichen versehene Scheibe ist klar, dass nur eine endliche Auflösung erreicht werden kann. Diese ist abhängig von der Unterteilung der Messscheibe.

Ein weiterer Punkt ist die Aufzeichnungsfrequenz. Bei der Aufzeichnung der Reifenpulse gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten:

1. Aufzeichnung der Pulse innerhalb eines Zeitintervalls
2. Aufzeichnung der Zeitpunkte der einzelnen Pulse

Bei den verwendeten Odometern wird die erste Variante genutzt. In äquidistanten Zeitabständen Δt wird aufgezeichnet wie viele Striche seit der letzten Messung überschritten wurden, um somit sagen zu können, welche Distanz gefahren wurde.

Diese beiden Einschränkungen führen zu Problemen, die in den nächsten Abschnitten erläutert werden.

5.2 Systematische Fehler

Die erste Kategorie von Fehlern sind systematische Fehler. Diese Fehler treten bei mehrfachen Messungen oder Aufzeichnungen immer wieder in der selben Ausprägung auf. Sie heben sich also nicht gegenseitig auf. Der Vorteil dieser Fehlerart ist, dass sie, im Gegensatz zu zufälligen Fehlern, besser behandelt werden können. Etwa durch das Vorwissen der Aufzeichnungsbedingungen oder durch eine geschickte Vorverarbeitung der Daten in der Berechnung, können diese Fehler verringert und so das Ergebnis verbessert werden. In diesem Abschnitt sollen systematische Fehler, wie sie bei der Odometrie auftreten, erläutert werden.

5.2.1 Fehler bei der Aufzeichnung

Im Folgenden werden die Fehler bei der Aufzeichnung beschrieben. Es handelt sich hierbei also um die Fehler, die durch das Odometer bedingt sind. Diese Fehler werden durch die in Punkt 5.1 erklärten Probleme hervor gerufen.

Das Odometer selbst ist eine Quelle von Fehlern. Wie in Kapitel 2 und im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben, sind in gleichmäßigen Abständen Messpunkte an den Reifen angebracht, die durch einen Inkrementalgeber gezählt werden. Durch die Tatsache, dass zu jeder Zeit immer nur sicher gesagt werden kann, zwischen welchen beiden Messpunkten sich der Reifen gerade befindet, entsteht eine Ungenauigkeit. Die Fehler, die dadurch entstehen, sind sowohl bei der Längenbestimmung, als auch bei der Bestimmung des Winkels und der Geschwindigkeit vorhanden.

Sei U der Umfang des Reifens, p die Anzahl der Pulse pro Umdrehung, dann ist der maximale Fehler

$$x_{max} = \frac{U}{p}. \quad (5.1)$$

Da die Wahrscheinlichkeit, an welcher Stelle der Reifen sich genau befindet, für alle Stellen zwischen diesen beiden Messpunkten gleich ist, ergibt sich der mittlere Fehler \bar{x}

gerade als Mittel zwischen dem minimalen Fehler $x_{min} = 0$ und dem maximalen Fehler zu

$$\bar{x} = \frac{x_{min} + x_{max}}{2}. \quad (5.2)$$

Bei 48 Messpunkten und einem Reifenumfang von 184 cm bedeutet dies beispielsweise, dass

$$\bar{x} = \frac{0 + \frac{184cm}{48}}{2} = 1.91\bar{6}cm \quad (5.3)$$

ist.

5.2.1.1 Fehler bei der Längenbestimmung

Bei der Messung der zurück gelegten Strecke durch einen Odometer können Fehler auf Grund der Auflösung auftreten. Der minimal messbare Unterschied entspricht dem Abstand der einzelnen Messpunkte an den Reifen. Bei p Pulsen pro Umdrehung (Anzahl der Messpunkte) an einem Reifen mit dem Umfang U können nur Vielfache von

$$s_{min} = \frac{U}{p} \quad (5.4)$$

bestimmt werden. Bei den Aufzeichnungen, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurden, betrug die Anzahl der Messstellen an einem Reifen 48 und der Umfang dieser Reifen etwa 184 cm. Damit ergibt sich eine minimal messbare Strecke von

$$s_{min} = \frac{U}{p} = \frac{184cm}{48} = 3.8\bar{3}cm \quad (5.5)$$

Wie sich diese Auflösung auf die minimal messbare Strecke niederschlägt, ist in Abbildung 5.2 in Abhängigkeit des Reifenumfang dargestellt.

Diese minimal messbare Strecke stellt die maximale Abweichung dar, die bei der Längenbestimmung auf Grund der Auflösung auftreten kann. Die exakte Stelle innerhalb eines Intervalls ist also nie bekannt. Mit gleicher Wahrscheinlichkeit kann jeder Punkt innerhalb der Intervalls $[0, s]$ der richtige Wert sein.

Diese Fehlerart kann nur durch eine erhöhte Auflösung des Odometers verringert werden. Eine Übersicht wie die Auflösung n mit der minimal messbaren Weglänge l zusammen hängt, ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Hierin sind für drei unterschiedliche Reifendurchmesser d die entsprechenden Werte gezeigt.

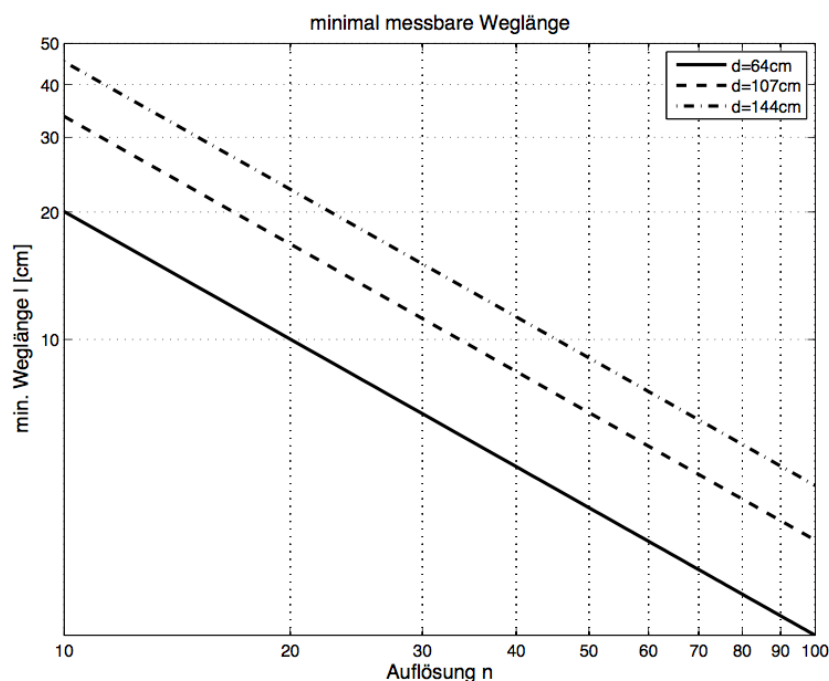


Abbildung 5.2: Minimal messbare Weglänge in Abhängigkeit von der Odometerauflösung aus [Lut07]

Da bei der Messung insgesamt nicht mehr als ein Intervall der Gesamtstrecke verloren gehen kann, ist dieser Fehler jedoch als vergleichsweise gering einzustufen. Die Fehler, die durch die im Anschluss beschriebenen Winkelungenauigkeiten entstehen, haben einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Bestimmung der Position.

5.2.1.2 Fehler bei der Winkelbestimmung

Durch die Ungenauigkeiten bei der Längenbestimmung ergibt sich auch ein Fehler bei der Bestimmung der Winkel. Hierbei wird die Differenz der beiden Längen genutzt. Da diese nicht exakt sind, kann der Winkel ebenso nicht exakt sein. Aus dem 3. Kapitel ging hervor, dass für die Spuren s_1 und s_2 , sowie für den Umfang U , die Anzahl der

Messpunkte m , die Spurweite s und die Anzahl der Pulse p_1 und p_2 für den Abbiegewinkel

$$\alpha_{min} = \frac{s_1 - s_2}{s} = \frac{\frac{U}{m} \cdot p_1 - \frac{U}{m} \cdot p_2}{s} = \frac{\frac{U}{m} \cdot (p_1 - p_2)}{s} = \frac{U \cdot (p_1 - p_2)}{m \cdot s} \quad (5.6)$$

gilt. Aus der konstanten Auflösung ergibt sich, dass eine minimal messbare Veränderung der Fahrtrichtung bei einem Unterschied von einem Reifenpuls besteht. Für diese minimale Änderung gilt

$$|p_1 - p_2| = 1 \text{ und damit } \alpha_{min} = \frac{U \cdot (p_1 - p_2)}{m \cdot s} = \frac{U \cdot (1)}{m \cdot s} = \frac{U}{m \cdot s}. \quad (5.7)$$

Für die genutzten Daten, mit $m = 48$, $U = 184cm$ und $s = 150cm$, bedeutet dies einen minimal messbaren Winkel von

$$\alpha_{min} = \frac{U}{m \cdot s} = \frac{184cm}{48 \cdot 150cm} = 0.02\bar{5}Rad. \quad (5.8)$$

Es können nur Vielfache dieses Winkels gemessen werden. Die auftretenden Winkel sind somit

$$\alpha = n \cdot \frac{U}{m \cdot s}, n \in \mathbb{N}_0. \quad (5.9)$$

Der Zusammenhang zwischen der Auflösung n und dem minimal messbaren Winkel ψ ist in Abbildung 5.3 zu sehen.

Auch diese Art von Fehlern kann nur durch eine Erhöhung der Auflösung des Odometers verringert werden. Der durch die Auflösung verursachte Fehler bei der Bestimmung des Winkels wirkt sich, im Gegensatz zur Längenbestimmung, viel deutlicher auf das Ergebnis aus. Gerade hierauf muss also ein besonderes Augenmerk geworfen werden.

Bei diesem Problem stellt sich die Frage, wie sich der Fehler bei der Bestimmung des Abbiegewinkels verringert lässt. Wie in den vorherigen Abschnitten bereits dargestellt, kann es vorkommen, dass trotz gerader Fahrt, bei einem Reifen ein Puls mehr gemessen wird, als bei dem gegenüber liegenden Reifen. Es würde also, trotz gerader Fahrt, eine Kurve errechnet werden. Wie bereits gezeigt wurde, ist für den Fall $|p_1 - p_2| = 1$ die Annahme einer geraden Fahrt sinnvoll.

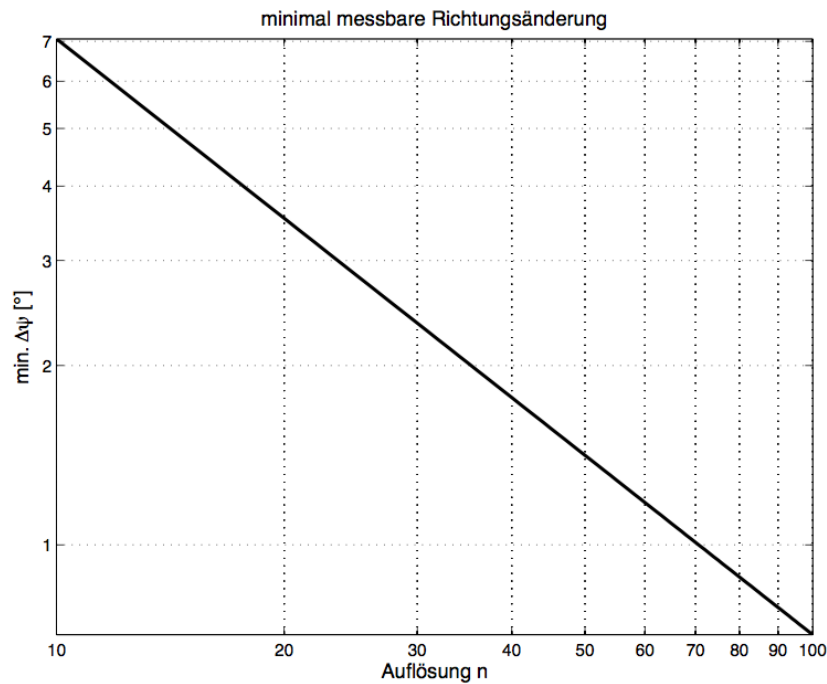


Abbildung 5.3: Minimal messbare Richtungsänderung aus [Lut07]

5.2.1.3 Fehler bei der Geschwindigkeitsbestimmung

Wird die Geschwindigkeit durch die Messung der Reifenpulse bestimmt, so tritt auch hierbei ein Fehler auf. Dieser ist ähnlich den Fehlern, die bei der Längen- und Winkelbestimmung gemacht werden. Für die durchschnittliche Geschwindigkeit $v(xy, i)$ eines Reifens xy im Intervall i gilt

$$v(xy, i + 1) = \frac{U_{xy} \cdot (p_{int}(xy, i + 1) - p_{int}(xy, i))}{t_{i+1} - t_i}. \quad (5.10)$$

Hier sind U der Umfang, p die Anzahl der Pulse pro Umdrehung, $p_{int}(xy, i)$ die gemessenen Pulse des Reifens xy im Intervall i und t_i der Zeitstempel nach dem entsprechenden Intervall.

Der Zusammenhang zwischen der Auflösung n des Odometers und des maximalen Geschwindigkeitsfehlers ist in Abbildung 5.4 zu sehen.

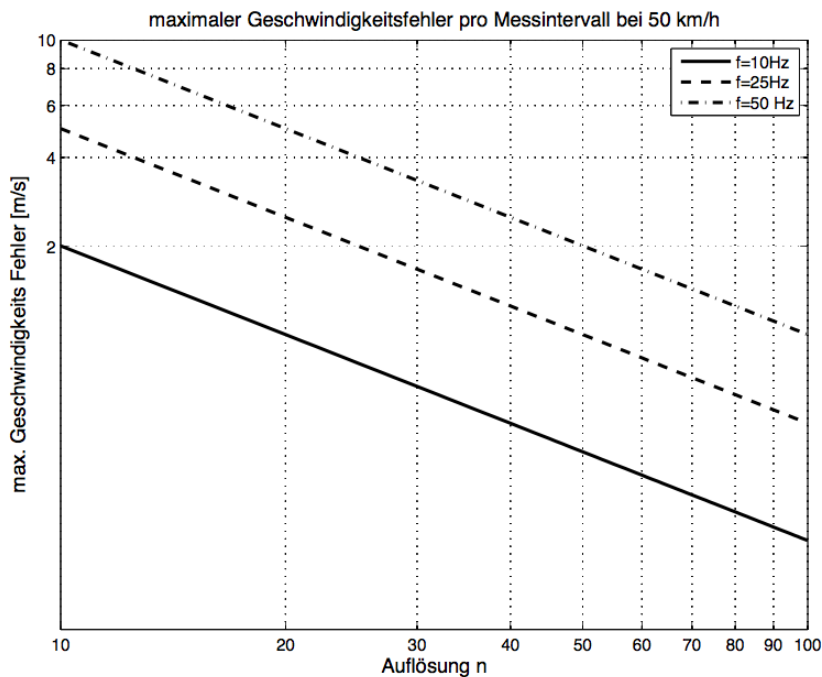


Abbildung 5.4: Maximaler Geschwindigkeitsfehler pro Messintervall bei 50 km/h aus [Lut07]

5.2.2 Fehler bei der Bestimmung der weiteren Variablen für die Berechnung

Zusätzlich zu den Fehlern, die bei der Aufzeichnung durch das Odometer auftreten können, gibt es weitere, systematische Fehler, die hier beschrieben werden sollen. Das Hauptproblem ist die korrekte Bestimmung des Reifenumfanges. In den nächsten beiden Abschnitten wird beschrieben, wie sich hierdurch Fehler äußern können.

5.2.2.1 Ungenaue Kenntnis des Reifenumfanges

Eine weitere Fehlerquelle ist der Reifenumfang. Dieser Fehler kann auf zwei Wegen entstehen. Zum einen ist der Reifenumfang zu Beginn der Fahrt nicht exakt bekannt. Viel wichtiger ist aber die Veränderung des Reifenumfanges während der Fahrt. Diese Veränderung kann zunächst durch die Erwärmung der Reifen auftreten. Außerdem kann sich eine schwerere Ladung in einer stärkeren Stauchung der Reifen äußern. Eine

unterschiedliche Gewichtsverteilung auf der linken und rechten Seite ist ein weiteres Problem.

Um diesen Fehler so weit wie möglich zu verringern, kann der Reifenumfang während der Fahrt mittels GPS, so lange dieses noch in Betrieb ist, berechnet werden. Für den Fall, dass vor einer abgeschlossenen Kalibrierung bereits ein GPS-Schatten auftritt, müssen Standard-Werte gespeichert und für den Fahrtbeginn genutzt werden.

Die Kalibrierung gegen das GPS läuft wie folgt ab:

Seien P_{i-1} und P_i zwei Punkte im globalen Koordinatensystem, die durch GPS bestimmt wurden. Diese wurden zu den Zeitpunkten t_{i-1} und t_i durchfahren. Außerdem ist bekannt, wie viele Pulse im Intervall $i = [t_{i-1}, t_i]$ gemessen wurden. Die Anzahl der Pulse pro Umdrehung sei p . Für den Reifenumfang U gilt dann

$$U_{xy} = \frac{\text{gefahrte Strecke}}{\text{Anzahl der Umdrehungen}} = \frac{P_{i-1} - P_i}{\frac{\text{pint}(xy,i)}{p}}. \quad (5.11)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Messung bei gerade Fahrt erfolgen muss und mit einem möglichst exakten GPS-Signal (inkl. dem Höhenunterschied), um keine weiteren Fehler zu produzieren.

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Fehler treten auch hier auf. Bei den für diese Arbeit vorliegenden Testdaten liegt der Fehler bei der Längenbestimmung, wie bereits gezeigt, jedoch bei etwa 2%, womit eine exakte Bestimmung des Umfangs hierdurch auch nicht möglich ist. Mit höheren Auflösungen müsste diese Variante der Fehlerverringerng zunächst getestet und verifiziert werden.

5.2.2.2 Unterschiedliche Reifenumfänge

Die fehlerhafte Bestimmung des Reifenumfangs ist ein Fehler, der auftreten kann. Der Unterschied, der zwischen zwei Reifenumfängen besteht, ist ein weiteres Problem bei den Berechnungen. Diese Abweichung kann durch ungleichmäßig starkes Abfahren der Reifen erfolgen, durch den Austausch von nur einem Reifen oder auch durch eine ungleichmäßige Verteilung des Gewichtes im Inneren des Wagens. Hierdurch wird ein Reifen mehr komprimiert, als der gegenüber liegende Reifen. Es ist zu erwarten, dass diese Auswirkungen im Vergleich zu den anderen Fehlern nur sehr klein sind. Dieser Fehler macht sich vor

allem bei der Bestimmung des Abbiegewinkels bemerkbar. Sei beispielsweise der linke Reifenumfang auf Grund des Verschleißes etwas geringer, als der Umfang des rechten Reifens. Wird nun eine leichte Linkskurve gefahren, so dass

$$s_{vl} < s_{vr} \quad (5.12)$$

gilt, jedoch gleichzeitig auch

$$p_{int}(vl, i) = p_{int}(vr, i), \quad (5.13)$$

dann würde fälschlicherweise dieser Abschnitt im Intervall i als Gerade angenommen werden.

Wie der zuvor beschriebenen Fehler, lässt sich dieser nur durch eine möglichst exakte Bestimmung des Umfang der einzelnen Reifen eliminieren.

Wie auch bei anderen Fehlern, führt es sich hierbei nur zu kleinen Abweichungen. Die Summe der Fehler, vor allem je länger die Strecke ist, resultiert jedoch in deutlich messbaren Positionsfehlern. Eines der Probleme, das zu einem unterschiedlichen Reifenumfang führen kann, ist ein schleichender Abfall des Reifendrucks.

5.3 Zufällige Fehler

Die zweite Fehlerklasse, die beschrieben wird, sind die nicht-systematischen Fehler. Diese sind zufällige Fehler. Ihr Auftreten und ihre Ausprägung sind nicht vorhersagbar und können daher nur in geringen Umfang oder gar nicht korrigiert werden. In diesem Abschnitt sollen einige zufällige Fehler beschrieben werden, die bei der Messung durch das Odometer auftreten können.

5.3.1 Schlupf

Ein zufällig auftretendes und nicht vorhersagbares Problem ist der Schlupf. Hierbei wird zwischen Antriebsschlupf und Bremschlupf unterschieden. Sofern die Beschleunigung und

die Verzögerung nicht zu hoch sind, ist zu erwarten, dass diese Fehler relativ klein ausfallen und sich im günstigsten Fall gegenseitig aufheben. Bezieht man den Antriebsschlupf

$$s_T = \frac{\omega - \omega_0}{\omega} \quad (5.14)$$

und den Bremschlupf

$$s_B = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (5.15)$$

mit in die Berechnung ein, so prägt sich dieser Fehler bei der Bestimmung der von einem Reifen abgefahrenen Spur folgendermaßen aus:

$$s_{int}(xy, i) = m \cdot \frac{U_{xy}}{p_{int}(xy, i) \cdot (1 + r_S) \cdot (1 - r_B)}. \quad (5.16)$$

Mit zunehmendem Schlupf werden mehr Pulse gemessen und dadurch als Ergebnis eine höhere Gesamtstrecke errechnet. Umgekehrtes gilt beim Blockieren der Räder. Unter der Annahme, dass

$$\frac{r_S}{r_B} \simeq 1 \quad (5.17)$$

ist, bleibt dieser Fehler also relativ gering. Weiterhin liegt es nahe, dass die vorrangige Betrachtung der nicht angetriebenen Fahrzeugachse den durch Antriebsschlupf verursachten Fehler verringert.

5.3.2 Ungenauigkeit durch Steigung und Gefälle

Durch Steigungen und Gefälle können bei der Berechnung durch die Odometrie Fehler auftreten. Während bei der Ortung durch GPS die Höhe irrelevant ist und nur Längen- und Breitengrad angegeben werden, muss bei der Positionsbestimmung auf Grund der Reifenbewegung der Höhenunterschied mit einbezogen werden. Bei der Fahrt ohne Steigung oder Gefälle werden keine Fehler dieser Art verursacht. Durch die maximale Steigung von Straßen ist außerdem dieser Fehler begrenzt, kann jedoch bei längerem bergauf- oder bergab fahren an Bedeutung gewinnen.

Der Fehler lässt sich in Abhängigkeit der Steigung beschreiben. Sei s_{odo} die durch die Odometrie aufgenommene Strecke, β die Steigung oder das Gefälle in Grad und s_{glob} die Positionsveränderung im globalen Koordinatensystem, dann gilt:

$$s_{glob} = s_{odo} \cdot \cos \beta. \quad (5.18)$$

Wie eingangs erwähnt, handelt es sich in diesem Abschnitt um zufällige Fehler. Nur durch Beachtung der Odometrie-Sensoren kann der Höhenunterschied nicht festgestellt und damit dieser Fehler nicht vermindert werden.

Kapitel 6

Evaluation

In diesem Kapitel wird die Evaluation der Ergebnisse vorgenommen. Zunächst wird zunächst gezeigt, wie die in Kapitel 5 vorgestellten Probleme und Fehlerquellen verringert werden können. Für den Test der Berechnung lagen mehrere aufgezeichnete Strecken vor. Eine dieser Strecken soll exemplarisch in diesem Kapitel vorgestellt werden. Diese wurde mit der berechneten Strecke verglichen. Zuletzt wird eine Übersicht gegeben, wie exakt die Auswertung der Odometriedaten durch den Prototypen erfolgen. Es wird gezeigt, welchen Einfluss die Vorverarbeitung der Daten auf das Ergebnis hat.

6.1 Vorverarbeitung der Messdaten

In diesem ersten Abschnitt werden Vorgehensweisen aufgezeigt, wie die aufgezeichneten Odometriedaten verarbeitet werden können, um systematische Fehler zu verringern. Das Hauptproblem bei der Messung besteht in der endlichen Auflösung des Odometers, wie es in Punkt 5.1 vorgestellt wurde.

Hier werden zunächst nur die angewandten Möglichkeiten der Vorverarbeitung erläutert. Die Auswertung erfolgt im zweiten Abschnitt des Kapitels.

6.1.1 Behandlung von minimalen Pulsunterschieden

Durch die Auflösung des Odometers in Zusammenhang mit dessen begrenzter Aufzeichnungsfrequenz, entsteht ein Fenster, innerhalb dessen der Messvorgang statt findet. Häufig tritt hierbei das Problem auf, dass nicht an beiden Reifen die gleiche Anzahl Pulse gemessen wird, obwohl sich beide Reifen gleich weit bewegt haben. Dieses Verhalten ist in Abbildung zu sehen.

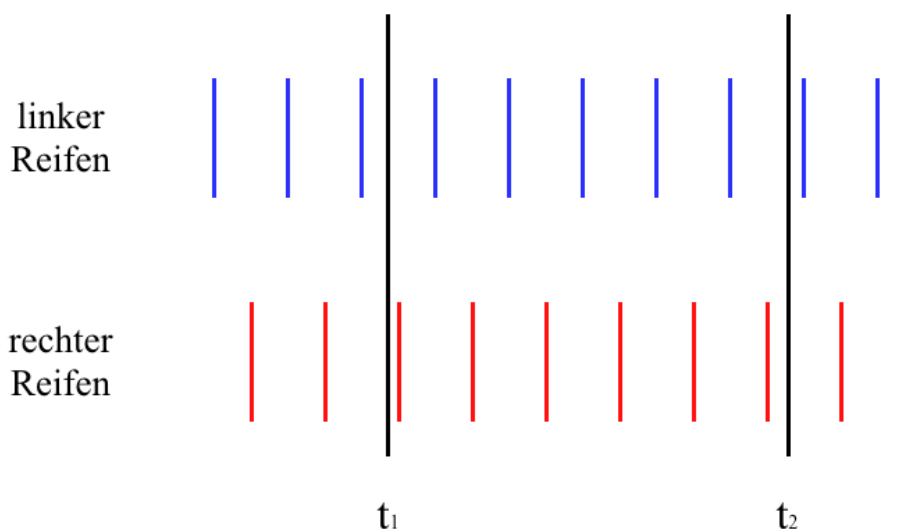


Abbildung 6.1: Verursachung eines minimalen Pulsunterschiedes durch einen zeitlichen Versatz der Pulsfolge.

Wird am linken Reifen kurz vor Ende eines Intervalls noch ein Puls gemessen, der entsprechende Puls am rechten Reifen aber erst im nächsten Intervall, so ist in Intervall $[t_1, t_2]$ für dieses Beispiel

$$p_{int}(vl, [t_1, t_2]) = 5 \text{ und } p_{int}(vr, [t_1, t_2]) = 6. \quad (6.1)$$

Durch das in Kapitel 3 vorgestellte Modell würde hier nun eine Linkskurve errechnet werden.

Da diese Art der Fehler, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, vorher bekannt ist, können Methoden entwickelt werden, um diesen Fehler zu verringern. Im Folgenden werden

die Möglichkeiten beschrieben und im zweiten Abschnitt auf die gezeigte Teststrecke angewandt.

6.1.1.1 Einfaches Ignorieren minimaler Pulsunterschiede

Die erste Möglichkeit bei der Behandlung der minimalen Pulsunterschiede (so genannte Counterfehler), besteht darin, sie ab einer vorgegebenen Grenze zu ignorieren und von einer Fahrt entlang einer Geraden auszugehen.

Sei u der Unterschied zwischen den am linken und am rechten Reifen gemessenen Pulsen:

$$u = |p_{int}(vl, i) - p_{int}(vr, i)|. \quad (6.2)$$

Bei dieser Variante werden nun für einen Grenzwert g die Pulsunterschiede ignoriert, falls $0 < u \leq g$ gilt. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht einfach die überschüssigen Pulse abgeschnitten werden dürfen, da sonst die Gesamtlänge der Strecke nicht mehr stimmen würde. Da jedoch gleichzeitig auch

$$p_{int}(vl, i) = p_{int}(vr, i) \quad (6.3)$$

nach der Manipulation gelten soll, bietet sich der Mittelwert an:

$$p_{int}(vl, i) = p_{int}(vr, i) = \frac{|p_{int}(vl, i) - p_{int}(vr, i)|}{2}. \quad (6.4)$$

Da bei gerader Fahrt

$$0 \leq u \leq 1 \quad (6.5)$$

gilt, ist es sinnvoll, $g = 1$ zu setzen. Ist $u > 1$, so handelt es sich sicher um eine Kurve. Hierbei würde durch das Ignorieren von Pulsen der Fehler vergrößert werden.

6.1.1.2 Alternierendes Ignorieren minimaler Pulsunterschiede

Eine Erweiterung des einfachen Ignorierens besteht im alternierenden Ignorieren. Der Hintergrund dieser Variante ist die Überlegung, dass nicht in zwei aufeinander folgenden Intervallen Counterfehler am selben Reifen vorliegen können. Ein Auftreten dieses Fehlers kann, zumindest bei direkt aufeinander folgenden Intervallen, nur abwechselnd erfolgen.

Auf Grund dessen liegt die Überlegung nahe, das Ignorieren von Counterfehlern am selben Reifen auszuschließen, sofern nicht vorher am gegenüberliegenden Reifen ein Puls ignoriert wurde. Wie sich in der späteren Auswirkungszeit, ist diese Methode nicht brauchbar und führt zu keiner Verbesserung.

6.1.1.3 Ignorieren minimaler Pulsunterschiede unter Einbeziehung der Kurven

Die nächste Möglichkeit, das einfache Ignorieren zu erweitern, besteht darin, die Kurven der berechneten Strecke zu beachten. Während bei gerader Fahrt minimale Unterschiede ignoriert werden sollten, gilt dies nicht für Kurven. Ist ein Pulsunterschied darauf zurück zu führen, dass er am Anfang oder am Ende einer Kurve auftritt, so liegt die Vermutung nahe, dass dieser Unterschied nicht ignoriert werden sollte.

Dieser Fall kann beschrieben werden, indem das vorherige Intervall $i - 1$ und das nachfolgende Intervall $i + 1$ mit einbezogen werden und $0 < u < g$ gilt. Ist $p_{int}(vl, i) > p_{int}(vr, i)$ erfüllt, so muss geprüft werden, ob

$$p_{int}(vl, i - 1) - p_{int}(vr, i - 1) > u \vee p_{int}(vl, i + 1) - p_{int}(vr, i + 1) > u \quad (6.6)$$

gilt.

Ist $p_{int}(vl, i) < p_{int}(vr, i)$ erfüllt, muss geprüft werden, ob

$$p_{int}(vr, i - 1) - p_{int}(vl, i - 1) > u \vee p_{int}(vr, i + 1) - p_{int}(vl, i + 1) > u \quad (6.7)$$

gilt. Liegen in diesen angrenzenden Bereichen größere Pulsunterschiede in die gleiche Richtung vor, so werden die Pulsunterschiede im Intervall i doch nicht ignoriert. Bei dieser Vorgehensweise wird der Beginn oder das Ende einer Kurve also nicht begradigt.

6.1.1.4 Vergleich mit der zweiten Achse

Die letzte Möglichkeit im Rahmen des Ignorierens von Pulsen besteht darin, die anderen Achsen des Fahrzeuges mit in die Berechnung einzubeziehen. Für die Betrachtung des Unterschiedes werden die Summen der linken und der rechten Pulse genutzt:

$$p_{int}(links, i) = p_{int}(vl, i) + p_{int}(hl, i) \text{ und } p_{int}(rechts, i) = p_{int}(vr, i) + p_{int}(hr, i).$$

Sei nun wieder $u_{ges} = |p_{int}(links, i) - p_{int}(rechts, i)|$, dann können hierbei drei Fälle unterschieden werden:

1. $0 \leq u_{ges} < g$,
2. $u_{ges} = g$ und
3. $g < u_{ges}$.

Sei, wie in 6.1.1.1 beschrieben, $g = 1$. Im zweiten Fall gilt demnach, bei einem Unterschied von einem Puls an der Vorderachse, dass an der Hinterachse auf beiden Seiten die gleiche Pulszahl gemessen wurde. Dies kann als Indiz für einen Counterfehler interpretiert werden.

Deutlichere Schlüsse können jedoch in Fall 1 und 3 gezogen werden. Tritt an der Hinterachse der Pulsunterschied genau in die andere Richtung auf und ist vom Betrag her gleich, dann gilt $u_{ges} = 0$. In diesem Fall liegt es nahe, dass zumindest an einer Fahrzeugachse in diesem Intervall ein Counterfehler vorliegt.

Fall 3 tritt ein, wenn an beiden Fahrzeugachsen ein Pulsüberschuss auf der selben Seite vorliegt. Dies ist wiederum ein Indiz für eine Kurve, da diese an beiden Fahrzeugachsen gemessen wurde. In Intervallen, in denen gleichzeitig an der Vorder- und an der Hinter-

achse ein Counterfehler auf der gleichen Seite vorliegt, führt dies jedoch wiederum zu Folgefehlern, die nicht vermieden werden können.

Wie im späteren Teil dieses Kapitels jedoch an den Auswertungen und Abweichungen zu sehen ist, bietet sich der Vergleich mit den übrigen Fahrzeugachsen an und bringt Verbesserungen bei der Genauigkeit.

6.1.1.5 Glättung von Minimalunterschieden

Eine weitere Variante, Messfehler zu verringern, besteht darin, dass eine Glättung vorgenommen wird. Auch bei dieser Variante werden die Intervalle vor und nach dem zu betrachtenden Intervall i mit einbezogen. Dieses Verfahren ist eine Umkehrung des Ignorierens von Pulsunterschieden aus Punkt 6.1.1.3.

Der Radius r gibt an, wie viele Intervalle um i betrachtet werden sollen. Wenn nun in allen Intervallen um i eine Gerade vorliegt, so soll auch i als Gerade betrachtet werden. Es muss also

$$p_{int}(vl, j) = p_{int}(vr, j) \quad \forall j \in M, \text{ mit } M = \{i - r, i - r + 1, \dots, i + r - 1, i + r\} \setminus \{i\} \quad (6.8)$$

erfüllt sein, damit

$$p_{int}(vl, i) = p_{int}(vr, i) = \frac{|p_{int}(vl, i) - p_{int}(vr, i)|}{2} \quad (6.9)$$

gesetzt wird.

6.1.2 Betrachtung der Vor- und Nachteile einer Mindestpulszahl

Nachdem nun beschrieben wurde, wie mit den minimalen Pulsunterschieden umgegangen werden kann, soll als nächstes auf eine Methode eingegangen werden, die dazu beiträgt, die Abweichung möglichst gering zu halten. Die hier beschriebene Mindestpulszahl verringert vor allem den durch die Aufzeichnungsfrequenz hervor gerufenen Counterfehler.

Die Abweichung, die durch einen Counterfehler auftreten kann, lässt sich wie folgt beschreiben:

Die Strecke $s_{int}(xy, i)$ eines Reifens xy im Intervall i , wie sie in Gleichung 4.3 beschrieben wurde, ist

$$s_{int}(xy, i) = m \cdot \frac{U_{xy}}{p_{int}(xy, i)}. \quad (6.10)$$

Die Abweichung auf Grund des Counterfehlers lässt sich durch

$$\Delta s_{int}(xy, i) = \frac{\Delta p_{int}(xy, i)}{p_{int}(xy, i)} \quad (6.11)$$

beschreiben, wobei $\Delta p_{int}(xy, i) = 1$ gilt. Je höher also die Anzahl der Pulse in einem betrachteten Intervall ist, desto geringer schlägt der Counterfehler auf die berechnete Strecke nieder.

Um den Counterfehler also möglichst gering zu halten, bietet es sich an, möglichst große Intervalle zu betrachten. Werden grundsätzlich nur Intervalle mit $p_{int}(xy, i) > m$ betrachtet, so liegt dieser Fehler maximal bei $\frac{1}{m}$.

Die Intervalle können jedoch nicht beliebig groß gewählt werden. Durch größere Intervalle treten wiederum neue Fehler auf. Wie in Kapitel 3 bereits diskutiert, wird eine Intervall stets als Gerade oder als Abschnitt eines Kreisbogens angenommen. Für möglichst kleine Intervalle führt diese Annahme trotzdem zu einem sehr nah an der Realität liegenden Ergebnis. Je größer nun die Mindestpulszahl m gewählt wird, desto wahrscheinlicher ist es, dass in einem Zeitabschnitt nicht nur eine Gerade oder eine Kurve auftritt, sondern eine Mischform.

Hierdurch werden Kurvenabschnitte, in denen auch gerade Anteile enthalten sind, nur als Kurve berechnet. Bei zu groß gewählten Intervallen und dem Fall, dass sowohl eine Rechts- als auch eine Linkskurve gefahren wird, kann sogar als Ergebnis eine Gerade entstehen, wenn insgesamt

$$p_{int}(vl, i) = p_{int}(vr, i) \quad (6.12)$$

gegeben ist. Die Ermittlung einer optimalen Mindestpulszahl m ist ein Teil, der mit den im zweiten Abschnitt vorgestellten Tests erreicht werden soll.

6.1.3 Approximation

Die letzte hier beschriebene Vorverarbeitung der Messdaten ist die Approximation. Sie wird mit der Idee angewandt, zu starke Schwankungen zwischen einzelnen Intervallen, die durch Fehlmessungen entstanden sind, zu verringern. Hierbei werden, wie bei der Glättung, mehrere Intervalle betrachtet. In diesem Fall wird jedoch nicht nur geprüft, ob eine Gerade vorliegt, sondern die Werte der benachbarten Intervalle beeinflussen den Wert des Intervalls i .

Dabei ergibt sich der approximierte Wert für $p_{int}(xy, i)$ aus dem gewichteten Mittelwert der umliegenden Intervalle. Sei beispielsweise der Radius $r = 2$ gewählt, so gilt für den linken Vorderreifen

$$p_{int}(i) = \frac{\alpha \cdot p_{int}(i-2) + \beta \cdot p_{int}(i-1) + \gamma \cdot p_{int}(i) + \delta \cdot p_{int}(i+1) + \epsilon \cdot p_{int}(i+2)}{\alpha + \beta + \gamma + \delta + \epsilon}. \quad (6.13)$$

Soll die Gewichtung linear verlaufen und zudem der Wert des betrachteten Intervalls i am stärksten gewichtet sein, dann können die Gewichte folgendermaßen gewählt werden:

$$\alpha = \epsilon, \beta = \delta = 2 \cdot \alpha \text{ und } \gamma = 3 \cdot \alpha. \quad (6.14)$$

Mit der Approximation sind alle im Rahmen dieser Arbeit an den Teststrecken vorgenommene Vorverarbeitung der Daten beschrieben. Welche sich davon positiv auf das Ergebnis auswirken und welche Verbesserungen sie mit sich bringen, wird im anschließenden Teil beschrieben.

6.2 Vorstellung und Auswertung der Ergebnisse

Der zweite Teil dieses Kapitels besteht aus der Vorstellung der erzielten Ergebnisse. Auf die Teststrecken wurde im Rahmen des in Kapitel 4 vorgestellten Prototypen das in Kapitel 3 vorgestellte Verfahren angewandt. Die in Kapitel 5 beschriebenen Probleme wurden durch die im ersten Teil dieses Kapitels beschriebene Vorverarbeitung soweit wie

möglich verringert. Der folgende Abschnitt führt damit alle anderen Kapitel zusammen und bildet das Bindeglied dieser Arbeit.

Für diese Arbeit standen mehrere Testaufzeichnungen zur Verfügung. Die Auswertung einer dieser Aufzeichnungen wird exemplarisch im Folgenden dargestellt. Daran soll gezeigt werden, wie die Abweichungen zur gefahrenen Strecke aussehen, wenn die im ersten Teil dieses Kapitels beschriebenen Verfahren zur Vorverarbeitung genutzt werden und wie sich diese auf die Ergebnisse auswirken. Ziel ist es, die optimalen Parameter zu bestimmen und heraus zu finden, ob damit die Odometrie nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch als Ersatz während einer GPS-Abschattung dienen kann.

6.2.1 Teststrecke

Zunächst wird die gefahrene Teststrecke vorgestellt und einzelne Abschnitte gezeigt, die später bei der Berechnung als Referenz dienen sollen. Bei dieser Aufzeichnung handelt es sich um einen 12.3km langen Abschnitt in der Pariser Innenstadt. Der Streckenverlauf ist in Abbildung 6.2 zu sehen.

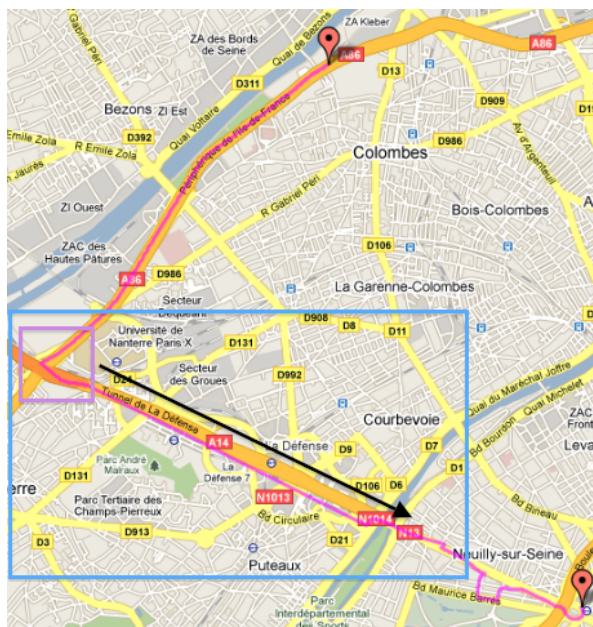


Abbildung 6.2: GPS-Daten der Teststrecke

Hierbei ist vor allem der blau markierte Bereich hervorzuheben. Innerhalb dieses Bereiches ist in diesem Beispiel immer wieder der Verlust des GPS-Signals zu verzeichnen. Markante Stellen, an denen später die Güte der Odometrie festgestellt werden kann, sind der lila markierte Kreisverkehr und der gerade verlaufende Streckenabschnitt entlang des schwarzen Pfeils. Im Rahmen der Tests wird der berechnete Streckenverlauf ab dem Ausfall des GPS mit der tatsächlich gefahrenen Strecke verglichen, da ab dieser Stelle die Odometrie als Ersatz in eCall eingesetzt werden soll.

6.2.2 Berechnete Strecke

Die auf Grund der vorliegenden Reifendaten berechnete Gesamtstrecke ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Hier sind beide Strecken in einem UTM-Koordinatensystem zu sehen. UTM ermöglicht die direkte Angabe von Distanzen in Metern. Die gefahrene Strecke ist schwarz, die errechnete Strecke rot markiert.

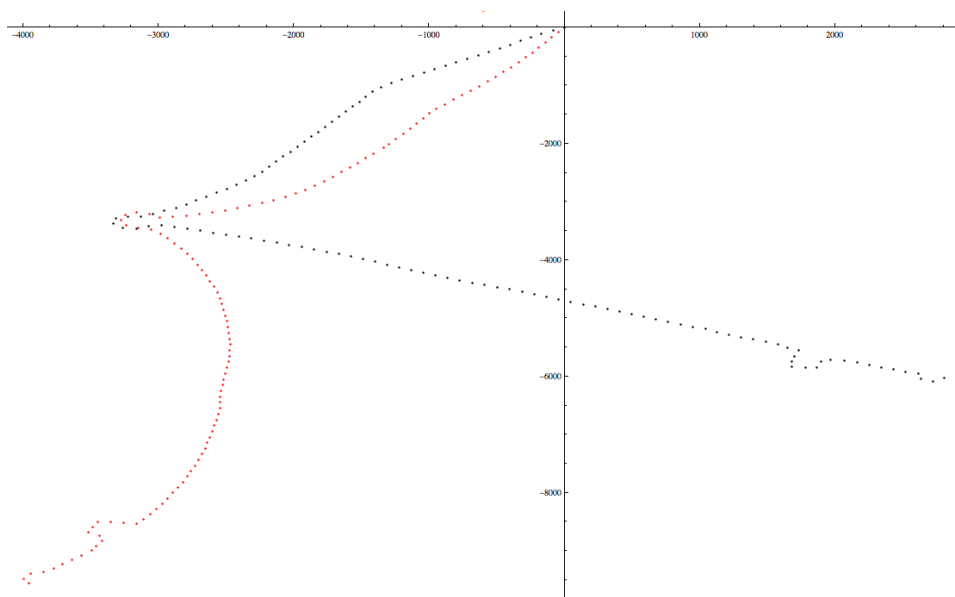


Abbildung 6.3: Berechnete Strecke (worst case)

Im direkten Vergleich ist zu erkennen, dass vor allem der lange, gerade Abschnitt sehr verfälscht wird. Außerdem besteht ein großes Problem bei den korrekten Abbiegewinkeln. Dies ist auf das bereits in Kapitel 5 beschriebene Problem der Auflösung zurück zu führen. In einem zweiten Vergleich (Abbildung 6.4) ist zu erkennen, welche Verbesserungen

erreicht werden können, in dem bestimmte der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Verfahren angewandt werden.

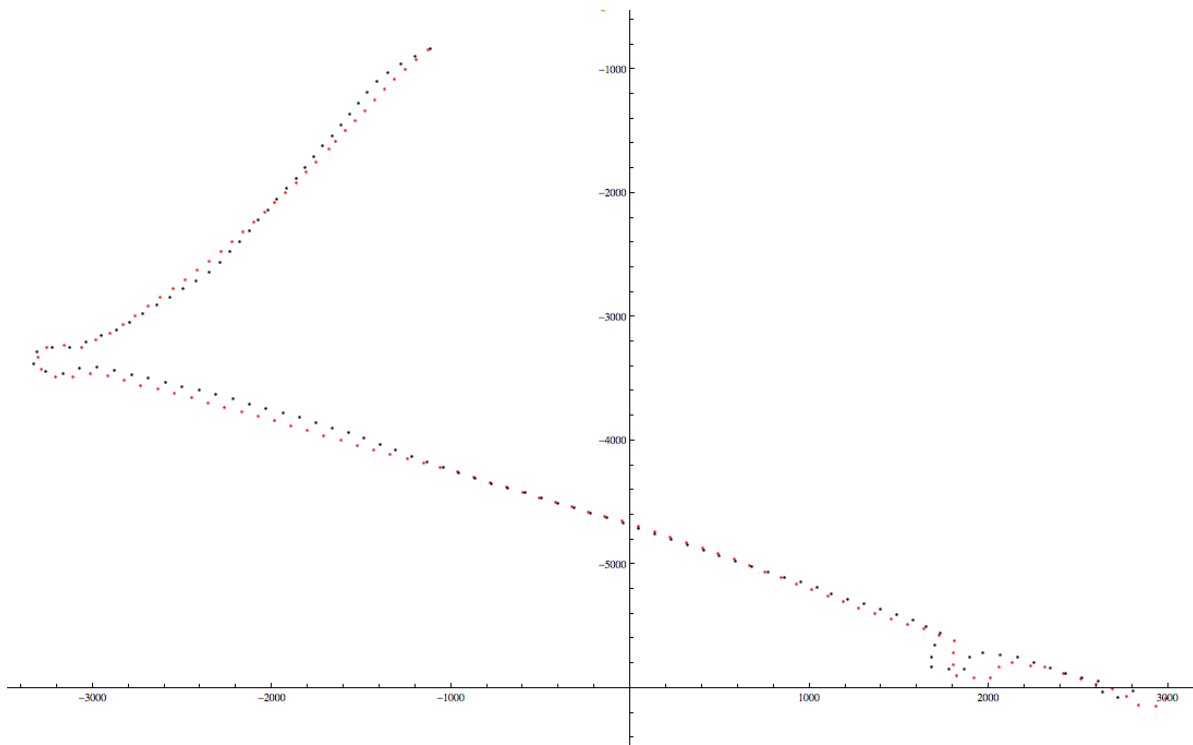


Abbildung 6.4: Berechnete Strecke (best case)

Das Ergebnis dieser Verbesserungen ist bereits im grafischen Vergleich zu erkennen. Im Folgenden werden die auftretenden Abweichungen in Abhängigkeit der Parameterwahl aus 6.1 gezeigt.

6.2.3 Auswertung der Fehler und der Genauigkeit

Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Auswertung der Teststrecke, um daran Abweichungen und Fehlerquellen aufzeigen zu können. Wie oben erwähnt, liegt hierbei besonderes Augenmerk auf den Bereichen, in denen eine GPS-Abschattung vorhanden ist und daher nicht mittels GPS die Position bestimmt werden kann.

Für die Auswertung wurde als Streuungsparameter die Varianz, also das arithmetische Mittel der quadratischen Abweichungen, gewählt. Diese ist definiert durch:¹

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E(i) - \mu)^2. \quad (6.15)$$

Hierbei ist $E(i)$ der Erwartungswert für das Intervall i , μ die Abweichung von diesem Erwartungswert und n die Anzahl der betrachteten Intervalle.

Um einen Vergleich ziehen zu können, wurden die Referenzstrecke und die berechnete Strecke in Abschnitte aufgeteilt. Die Position und die gegenseitige Abweichung nach diesen Abschnitten wurden bestimmt. Für die in Abbildung 6.4 dargestellten Ergebnisse wurden beispielsweise nach jeweils 500 Metern die Positionen bestimmt. Die Position der gefahrenen Strecke ist dabei jeweils der Erwartungswert und die Differenz der berechneten Strecke zu diesem Erwartungswert stellt die Abweichung μ dar. Die Anzahl der Intervalle ergibt sich aus der Gesamtstrecke und deren Einteilung:

$$n = \frac{\text{Länge der Gesamtstrecke}}{\text{Länge eines Intervalls}}. \quad (6.16)$$

Die festgestellten Ergebnisse sind Tabelle 6.1 zu entnehmen. Der obere Abschnitt der Tabelle stellt die Ergebnisse für nur eine betrachtete Fahrzeugachse dar (in diesem Fall die Vorderachse). Der untere Abschnitt bezieht sich auf die Auswertung beider Fahrzeugachsen. In beiden Fällen sind in der linken Spalte die in Punkt 6.1.1 beschriebenen Verfahren zur Vorverarbeitung zu finden. Die Angabe der Abweichung erfolgt in Metern. Zusätzlich sind die Abweichungen in Intervalle unterteilt und entsprechend diesen Intervallen farblich markiert. Diese sind:

- $0m \leq s^2 \leq 200m$: grün,
- $200m < s^2 \leq 400m$: gelb,
- $400m < s^2 \leq 600m$: orange.

Zunächst fällt auf, dass im Bereich von 200 bis 400 Mindestpulsen die besten Ergebnisse erzielt wurden und unterhalb der Grenze von 200 Pulsen die Abweichungen zu stark sind. Damit bestätigen sich die Vermutungen, dass es auf Grund der geringen Auflösung

¹vgl. [May06]

Ohne Vergleich beider Achsen											
Mindestpulszahl	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Ohne Veränderung	3131	3131	3134	3132	3135	3135	3137	3140	3139	3138	3141
Einfaches Ignorieren	5242	5169	3984	804	312	183	704	167	264	440	617
Alternierendes Ignorieren	3162	3159	3160	3156	3159	3154	3160	3156	3156	3156	3092
Ignorieren (ohne Kurven)	5242	5169	3984	804	312	183	704	167	264	440	617
Alternierend + ohne Kurven	3162	3159	3160	3156	3159	3154	3160	3159	3156	3156	3092
Glättung (r=3)	5242	5169	3984	804	312	183	704	167	264	440	617
Approximation (r=3)	5242	5169	3981	841	175	379	924	346	437	441	747
Approximation (r=5)	5242	5169	4015	1063	138	393	786	217	284	296	686

Mit Vergleich beider Achsen											
Mindestpulszahl	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Ohne Veränderung	3131	3131	3134	3132	3135	3135	3137	3140	3139	3138	3141
Einfaches Ignorieren	1105	1991	533	1392	540	421	398	188	181	403	760
Alternierendes Ignorieren	405	1047	706	530	679	945	754	759	1132	1116	1292
Ignorieren (ohne Kurven)	1105	1991	533	1392	540	421	398	188	181	403	760
Alternierend + ohne Kurven	405	1047	706	530	679	945	754	759	1132	1116	1292
Glättung (r=3)	1105	1991	533	1392	540	421	398	188	181	403	760
Approximation (r=3)	1106	1988	526	1364	312	688	617	144	222	526	879
Approximation (r=5)	1106	1986	573	1144	233	697	509	153	203	418	794

Tabelle 6.1: Vergleich der Abweichungen für unterschiedliche Parameter und Vorverarbeitungsverfahren

von 48 Pulsen pro Umdrehung zu deutlichen Problemen kommen kann. Diese werden durch die Zusammenfassung mehrere Intervalle verbessert. Werden zu viele Intervalle zusammen gefasst, was hier etwa ab 450 Pulsen der Fall ist, sinkt die Genauigkeit wieder, da zu viele Kurven verloren gehen.

Weiterhin ist auffällig, dass bestimmte Zeilen identisch sind. So bringt etwa das alternierende Ignorieren minimaler Pulsunterschiede, sowohl mit als auch ohne die beschriebene Einbeziehung vor und nach Kurven, keine Veränderung gegenüber den unveränderten Daten.

Ausreißer treten bei den Ergebnissen ebenfalls auf. Zunächst kann das alternierenden Ignorieren minimaler Pulsunterschiede bei einer Mindestpulszahl von 0 als nachteilig gegenüber den anderen Verfahren betrachtet werden. Außerdem unterscheidet sich die Spalte mit 300 Mindestpulsen bei der Betrachtung von nur einer Fahrzeugachse deutlich von den Ergebnissen mit mehr oder weniger als 300 Pulsen.

In diesen Ergebnissen liegen die Intervalle gerade besonders günstig oder ungünstig, so dass es zu einem plötzlichen Anstieg oder Abfall der Varianz kommt. Wählt man beispielsweise eine Mindestpulszahl von 158, so kann sogar eine Varianz von unter 100 Metern erreicht werden. Über einen größeren Bereich hinweg, pendelt sich diese jedoch bei den in der

Tabelle entnehmbaren Werten von etwa 150 Metern ein. Lässt man diese Tests in noch kleineren Abständen bei den Mindestpulszahlen laufen, so ergibt sich eine Verteilung, wie sie in Abbildung 6.5 zu sehen ist. Hier sind auf der x-Achse (oben) die Mindestpulse abgetragen. Die z-Achse (rechts unten) stellt die unterschiedlichen Mindestintervallauern in Sekunden dar. Anhand der y-Achse (links) ist dann die Varianz in Metern abzulesen. Wie deutlich zu sehen ist, kommt es hier immer wieder zu Sprüngen in den Bereichen zwischen 0 bis 200 Mindestpulsen. Erst ab etwa 250 Mindestpulsen glättet sich dieses Verhalten, so dass dieser Bereich als brauchbar angenommen werden kann. Wählt man eine Mindestpulszahl von unter 200, so ist es Zufall, ob die Abweichung gerade gut oder schlecht ist. Auf Grund des deutlich weniger von Schwankungen betroffenen Bereichs zwischen 200 und 450 Mindestpulsen, kann bei der Wahl des Parameters hier von einem brauchbaren Ergebnis ausgegangen werden.

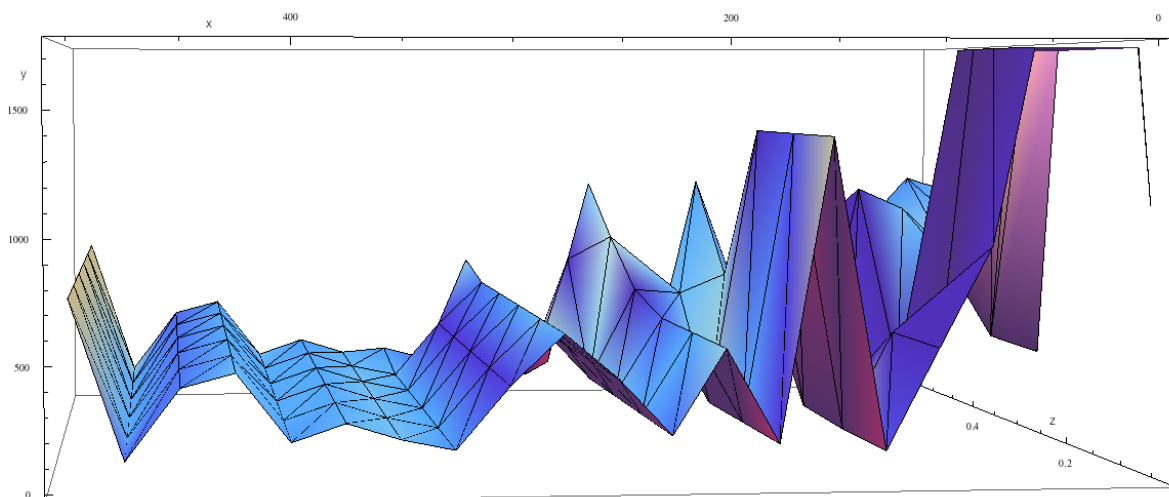


Abbildung 6.5: Vergleich der Varianz für unterschiedliche Mindestpulszahlen und Mindestintervallauern

Beachtet man nun diese Ausreißer in Tabelle 6.1 nicht, so kann daraus empirisch geschlossen werden, dass der optimale Bereich für die Mindestpulszahl bei 300 bis 350 liegt. Dies entspricht bei 48 Pulsen pro Umdrehung etwa sechs bis sieben Reifenumfängen. Weiterhin ist die Anwendung des einfachen Ignorierens minimaler Pulsunterschiede mit oder ohne einer Approximation als bestes Ergebnis anzusehen.

Insgesamt konnte durch die Berechnung der Varianz gezeigt werden, dass die Odometrie zwar bei weitem nicht ausreichend genau arbeitet, um GPS vollständig zu ersetzen. Das Ziel dieser Arbeit war jedoch die Untersuchung der Odometrie als Ergänzung zur

Positionsbestimmung durch GPS.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Phase einer GPS-Abschattung durch die Odometrie bis zu einem bestimmten Grad überbrückt werden kann. Eine Abweichung von etwa 150 Metern bringt Rettungskräfte nahe genug an den Unfallort heran. Je länger dieser GPS-Schatten jedoch andauert, desto weiter driften die berechneten Positionen weg und es ist ein Abgleich mit einer globalen Referenz notwendig.

Kapitel 7

Schluss

Das letzte Kapitel der vorliegenden Arbeit gibt einen Überblick über die mit dieser Arbeit erreichten Ergebnisse.

Es wird zunächst zusammengefasst, welche Problemstellung, Aufgaben und Ziele für diese Arbeit vorlagen. Anschließend werden Methoden gezeigt, mit denen diese Ziele erreicht wurden, um letztendlich eine Zusammenfassung der Ergebnisse zu erstellen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden.

Auf diesen Ergebnissen aufbauend soll eine Bewertung dieser erfolgen. Zunächst steht die Frage nach der Anwendbarkeit im Vordergrund. Diese Frage zielt vor allem auf die Bewertung der Odometrie und deren Abweichung. Es sollen Aussagen darüber gemacht werden, ob sich eine Verbesserung erzielen lässt, für den Fall, dass das GPS-Modul ausfällt.

Abschließend wird ein Ausblick gegeben, der erläutert, an welchen Punkten nun weiter angesetzt werden kann und welche Möglichkeiten es zusätzlich gibt, die Positionsbestimmung für eCall zu verbessern.

7.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die Problemstellung, auf der diese Arbeit aufbaute, war die Positionsbestimmung bei dem automatischen Notrufsystem eCall. Sobald ein Notruf abgesetzt wird, muss die Position bekannt sein, damit diese mitgesandt werden kann und die Rettungskräfte den genauen Ort des Unfalls kennen. Diese Position wird im Normalfall durch GPS ermittelt, wofür jedoch der Abgleich mit mindestens drei, beziehungsweise vier, Satelliten notwendig ist. Ist dies jedoch nicht gewährleistet, wie etwa in Tunneln, dichten Wäldern oder ähnlichem, kann die Position nicht sicher bestimmt und als Alternative nur die zuletzt bekannte Position genutzt werden. Bei einem länger andauernden Ausfall des GPS steigt auch die Ungewissheit über die Position. In diesem Fall kann durch eCall keine schnellere Versorgung der Verunglückten gewährleistet werden.

Das Ziel und die Motivation dieser Arbeit war daher die Erarbeitung einer Alternative für den Fall, in dem sich das verunglückte Fahrzeug in einem GPS-Schatten befindet. In diesem Fall müssen Alternativen betrachtet werden, bei denen keine Systeme außerhalb des Fahrzeuges für die Ortung notwendig sind. Die Positionsbestimmung muss also als autonome Eigenortung vorgenommen werden.

Für diese Art der Ortung wurde im Rahmen der Arbeit die Odometrie untersucht. Dabei handelt es sich um die Bestimmung der Position eines Fahrzeuges auf Grund der Reifenbewegung. Diese Variante bot zusätzlich den Vorteil, dass eines der von der Europäischen Kommission geforderten Kriterien, nämlich die möglichst kostengünstige Produktion von eCall, weiterhin gewährleistet werden kann. In jedem Fahrzeug sind bereits unter anderem für das ABS und ASR Sensoren angebracht, die die Bewegung der Reifen auswerten. Diese dort gemessenen Daten können auch für die Odometrie verwendet werden.

Für die Bestimmung der Position durch einen Differential-Odometer mussten folgende Daten, die damit das Fundament der Berechnungen bieten, bekannt sein:

- Spurweite des Fahrzeuges
- letzte bekannte Position im globalen Koordinatensystem
- Fahrtrichtung im globalen Koordinatensystem vor dem Ausfall von GPS

- Aufzeichnung der Reifendaten (Odometrie-Daten)

Der erste Teil der Arbeit bestand zunächst darin, zu beschreiben, wie mit den vorhandenen Daten die Veränderung der Position bestimmt werden kann. Es wurde beschrieben, dass lediglich eine Positionsveränderung errechnet werden kann, jedoch nie eine absolute Position. Für diese ist ein Abgleich mit einem externen Referenzsystem notwendig. Die vorhandenen Daten wurden in Intervalle aufgeteilt und die Veränderung in diesen Intervallen berechnet. Die Bestimmung der folgenden Daten wurde vorgenommen:

- der Verschiebungsvektor \vec{v}
- der Abbiegewinkel α

Das daraus resultierende mathematische Modell beschreibt das Vorgehen unter den gemachten Annahmen so exakt, wie es die vorhandenen Daten zulassen.

Der zweite, darauf aufbauende Schritt bestand nun in der Anwendung auf reale Daten. Der hierfür entwickelte Prototyp stellte einen weiteren Abschnitt der Arbeit dar. Mit ihm sollten aufgezeichnete Daten ausgewertet und getestet werden. Nachdem das Design beschrieben wurde, konnte gezeigt werden, zu welchem Ergebnis man auf Grund der Odometrie-Daten kommt.

Ein weiterer, zentraler Punkt dieser Darstellung war die Diskussion der auftretenden Fehler. In Kapitel 5 wurde zwischen systematischen und nicht-systematischen Fehlern unterschieden. Die Möglichkeiten, wie diese systematischen Fehler durch Vorverarbeitung der Daten oder durch eine Verbesserung bei der Aufzeichnung möglichst verringert werden können, waren ein wichtiger Teil des 4. Kapitels. Am Ende wurden für die vorhandene Referenz-Strecke die Ergebnisse in Kapitel 6 vorgestellt und eine Auswertung erstellt, die unter anderem die Genauigkeit dieser Ergebnisse zeigt.

7.2 Bewertung der erzielten Ergebnisse

An Hand der bereits beschriebenen Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass eine Verbesserung der Positionsbestimmung beim Ausfall von GPS mittels der Odometrie zwar möglich ist, die Abweichung der errechneten Position im Vergleich zur tatsächlichen Position fällt jedoch deutlich größer aus, als vergleichsweise mit GPS. Je länger die Fahrt

ohne GPS-Ortung andauert, desto weiter driftet auch das Ergebnis ab. Ein regelmäßiger Abgleich mit einem Referenzsystem ist daher notwendig.

Die Odometrie bietet deutliche Vorteile, wenn sie zusätzlich genutzt wird. Bei alleiniger Anwendung von GPS kann bei einem Unfall im GPS-Schatten als mögliche Position für das verunglückte Fahrzeug nur ein sehr großes Suchgebiet angegeben werden. Dabei handelt es sich um einen Kreis, dessen Mittelpunkt die letzte, bekannte Position und dessen Radius die seitdem zurück gelegte Strecke ist. Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass dank der Odometrie dieser Suchradius deutlich eingeschränkt, wenn auch nicht vollständig vermieden werden kann.

Die Odometrie kann demnach als zusätzliche Absicherung für eCall vorteilhaft genutzt werden, ist für alleinige Verwendung jedoch nicht genau genug.

7.3 Ausblick

Den Abschluss dieser Arbeit bildet ein Ausblick, der aufzeigt, wie an den erzielten Ergebnissen angesetzt werden kann. Vor allem, welche weiteren Ideen es gibt, um die Effizienz von eCall zu verbessern, speziell im Hinblick auf die Auffindung des verunglückten Fahrzeuges.

Wie in der Zusammenfassung im vorherigen Punkt bereits dargestellt wurde, stößt auch die Odometrie an Grenzen. Es wurden aufgezeichnete Strecken ausgewertet, die jedoch beliebig zusammen gesetzt waren. Ein weiterer Schritt wäre daher, mit mehreren, unterschiedlichen Fahrzeugen diverse Referenzstrecken zu fahren. Solche Strecken können folgende sein:

- exakte Gerade
- Wendekreis mit minimalem Radius

Diese Referenzstrecken müssten genutzt werden, um die systematischen Fehler noch weiter einzugrenzen und weitere Rückschlüsse auf Fehler ziehen zu können, die im Rahmen dieser Arbeit nicht festgestellt werden konnten.

Eine weitere Verbesserung der Odometrie wurde bereits in Kapitel 4 beschrieben: die Erhöhung der Auflösung des Odometers. Genau an dieser Stelle liegt das Hauptproblem bei der Verwendung eines Differential-Odometers. Diese Verbesserung würde zu einer Erhöhung der Genauigkeit bei der Berechnung der Abbiegewinkel führen.

Alternativ zur Berechnung des Abbiegewinkels durch das Odometer könnten andere Sensoren genutzt werden, wie sie im Grundlagenkapitel bereits vorgestellt wurden. Die Drehratensensoren, Gyroskope und der Lenkeinschlag sind nur einige Beispiele, die als Alternativen zur Berechnung der Position genutzt werden können. Zusammen mit dem Odometer kann die Genauigkeit durch eine Sensordatenfusion verbessert werden, bei der die Daten mehrerer Sensoren gegeneinander abgeglichen werden. Eine Methode, diese unterschiedlichen Daten auszuwerten und zu gewichten, ist der Kalman-Filter, beziehungsweise der erweiterte Kalman-Filter.

Eine Idee, die über diese Möglichkeiten noch hinaus geht, könnte ein System sein, welches etwa bei der Ortung von Lawinenopfern eingesetzt wird. Hier wird durch einen Sender im Notfall ein Signal ausgesandt, das von Rettungskräften empfangen werden kann. Übertragen auf eCall könnte man sich vorstellen, dass das System, falls es die Position nicht mehr exakt bestimmen konnte, ebenfalls ein solches Signal aussendet. Dieses Signal müsste dann wiederum von in der Nähe befindlichen Rettungsfahrzeugen oder auch anderen eCall-Nutzern empfangen werden können, um die Position des verunglückten Fahrzeuges zusätzlich mit der Position des in der Nähe befindlichen Fahrzeuges abzugleichen.

Durch die in der vorliegenden Arbeit erörterten Ergebnisse ergibt sich eine gute Verbesserung für eCall. Um noch effizienter bei der Bestimmung der Position eines sich im GPS-Schatten befindlichen Fahrzeuges arbeiten zu können, müssen diese jedoch noch erweitert werden.

Literaturverzeichnis

- [ADA08] ADAC, Deutschland: Was ist eCall? (2008). http://www1.adac.de/Verkehr/sicher_unterwegs/ecall/default.asp?TL=2. – Zuletzt abgerufen am 21.01.2010 um 17:19 Uhr
- [AHK⁺08] ARENS, T. ; HETTLICH, F. ; KARPFINGER, C. ; KOCKELKORN, U. ; LICHTENEGGER, K. ; STACHEL, H.: *Mathematik*. Spektrum, Akademischer Verlag, 2008
- [Aus99] AUSSEMS, T.: *Positionsschätzung von Landfahrzeugen mittels Kalman-Filterung aus Satelliten- und Koppelnavigationsbeobachtungen*. D82 (Diss. RWTH Aachen), Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Aachen, 1999
- [Bau97] BAUER, Manfred: *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. WICHMANN, 1997
- [BG03] BOSCH GMBH, Robert: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Band 25*. Friedr. Vieweg und Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2003
- [BW99] B. WIGGER, J. B.: *Navigation I + II*. Vorlesungsskriptum TU Darmstadt, FG Flugmechanik und Regelungstechnik, Darmstadt, 1999
- [CWGW06] COMPABILITY WORKING GROUP WG-1, GPS/GLONASS I.: *Joint Statement*. http://www.glonass-ianc.rsa.ru/i/glonass/joint_statement_eng.pdf. Version: 2006. – Zuletzt abgerufen am 20.01.2010 um 21:35 Uhr.

- [Div] DIVISION, ESA P.: *GALILEO - The European Programme for Global Navigation Services*. http://esamultimedia.esa.int/docs/galileo/GalileoE3web_copy.pdf. – Zuletzt abgerufen am 15.01.2010 um 21:56 Uhr.
- [Kee95] KEES, N.: *Kraftfahrzeugsensoren zur Eigengeschwindigkeitsmessung, Navigation und Fahrbahnzustandserkennung*. Dissertation Technische Universität München, Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, München, 1995
- [Koma] KOMMISSION, Europäische: *eCall*. http://ec.europa.eu/information_society/activities/esafety/ecall/index_en.htm. – Zuletzt abgerufen am 15.01.2010 um 15:19 Uhr.
- [Komb] KOMMISSION, Europäische: *eCall: Zeit zur Einführung*. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0434:FIN:DE:PDF>. – Zuletzt abgerufen am 21.01.2010 um 17:38 Uhr.
- [Kom02] KOMMISSION, Europäische: *Galileo, Unverzichtbar für Europa*. 2002
- [Kom06] KOMMISSION, Europäische: *Recommendations of the DG eCall for the introduction of the pan-European eCall*. http://www.esafetysupport.org/download/ecall_toolbox/Reports/Position_papers_DG_eCall_v2.pdf. Version: 2006. – Zuletzt abgerufen am 21.01.2010 um 19:27 Uhr.
- [Kom09] KOMMISSION, Europäische: Allgemeines Merkblatt 49. In: *eCall – Leben retten durch Kommunikationstechnologien im Fahrzeug* (2009). http://ec.europa.eu/information_society/doc/factsheets/049-eCall_august09_de.pdf. – Zuletzt abgerufen am 15.01.2010 um 15:19 Uhr
- [Lut07] LUTZ, Dipl.-Ing. A.: *Realisierung und Bewertung von Navigationsmethoden zur fahrzeugautonomen Positionsbestimmung mit low-cost Sensorik*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2007
- [Man04] MANSFELD, Werner: *Satellitenortung und Navigation*. vieweg, 2004

- [May06] MAYER, Horst: *Beschreibende Statistik*. HANSER, 2006
- [Pfe08] PFEIFER, Dipl.Ing. S.: *Optimierung der automatischen Notfallmeldung zur Rettung verunglückter Fahrzeuginsassen*. 2008
- [See93] SEEBER, G.: *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter Berlin, New-York, 1993
- [Ste01] STENBIT, J. P.: *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. Department of Defense, Washington, DC, 2001
- [Str97] STRAMPP, Walter: *Höhere Mathematik mit Mathematica, Teil 1*. 1997
- [TS] TAHAR, Dipl.-Phys. M. A. ; STOLLENWERK, Prof. Dr. J.: *Einführung in die Fehlerrechnung, Praktikumsunterlagen, Physikalisches Praktikum*. <http://www.physik.fh-koeln.de/physik/fehler/fehlerrechnung.pdf>. – Zuletzt abgerufen am 26.01.2010 um 22:29 Uhr.

Glossar

- Abbiegewinkel Dies ist der Winkel zwischen dem alten *Heading* und dem neuen *Heading*.
- ABS Das *Antiblockiersystem (ABS)*, in der StVZO „Automatischer Blockierverhinderer“ (ABV) genannt, ist ein vorwiegend in Kraftfahrzeugen, aber auch in Eisenbahnen und Flugzeugfahrwerken verwendetes technisches System zur Verbesserung der Fahrsicherheit und zur Minderung von Verschleiß an den Laufflächen der Räder. Es wirkt bei starkem Bremsen, insbesondere auf rutschigem Untergrund, einem möglichen Blockieren der Räder durch Verminderung des Bremsdrucks entgegen.
- Abschattung Die *Abschattung* ist die Phase bei der Navigation, in der kein *GPS*-Signal verfügbar ist.
- Antriebsschlupf Diese Art von *Schlupf* entsteht beim Anfahren. Die Räder drehen teilweise oder ganz durch und es werden so mehr *Reifenpulse* gemessen, als bei gleicher Weglänge ohne Schlupf. Das gegenteilige Verhalten ist der *Bremsschlupf*.
- Aufzeichnungsfrequenz Gibt die Frequenz an, mit der die *Reifendaten* in die Logdatei geschrieben werden.
- Auslenkung Bei einer Schwingung bezeichnet man die momentane Entfernung x des Punktes P (auf der Kurve) von seiner Ruhelage als *Auslenkung* oder *Elongation*.
- Autonome Ortung .. *Ortung* wird nur durch ein System durchgeführt.

- Autonome Selbstlokalisierung Selbstlokalisierung bedeutet, dass ein Objekt seine Position selbst berechnet. Autonom bedeutet, dass hierfür außerdem keine Hilfsmittel genutzt werden.
- Beschleunigungsmesser Ein *Beschleunigungssensor* ist ein Sensor (Fühler), der die Beschleunigung misst, indem die auf eine Testmasse wirkende Trägheitskraft bestimmt wird. Somit kann z. B. bestimmt werden, ob eine Geschwindigkeitszunahme oder -abnahme stattfindet. Der Beschleunigungssensor gehört zur Gruppe der Inertialsensoren.
- Bogenmaß Beim *Bogenmaß* handelt es sich um ein Winkelmaß, das im Maß Radiant gemessen wird.
- Bremsschlupf Diese Art von *Schlupf* entsteht beim Bremsen. Die Räder blockieren teilweise oder ganz und es werden weniger *Reifenpulse* gemessen, als bei gleicher Weglänge ohne Schlupf. Das gegenteilige Verhalten ist der *Antriebsschlupf*.
- Caller Line Identification Rufnummer des Anrufers
- CLI siehe *Caller Line Identification*
- Coriolis-Effekt Die *Corioliskraft* gehört zu den Schein- oder Trägheitskräften. Sie wirkt auf jeden Körper, dessen Bewegung in einem rotierenden Bezugssystem beschrieben wird. Benannt ist sie nach Gaspard Gustave de Coriolis, der sie 1835 erstmals mathematisch herleitete.
- Counterfehler Dieser Fehler tritt allgemein bei Countern auf. Es können immer nur diskrete Schritte gezählt werden. Somit entsteht immer eine Ungewissheit, an welcher Stelle zwischen zwei Messpunkten man sich befindet.
- Crash-Sensor Als Crash-Sensor dient bei eCall der Airbag. Sobald der Airbag ausgelöst wird, wird ein eCall gestartet.
- Delay Verzögerung

- Differential-Odometer Das *Differential–Odometer* ist eine Erweiterung des *Odometers*. Hierbei können beide Reifen einer Achse getrennt gemessen werden. Somit ist eine Auswertung der Differenz und damit eine Berechnung der *Abbiegewinkel* möglich.
- Doppler-Radar Ein *Doppler–Rader* ist ein Radar, das sich den *Doppler–Effekt* zu nutze macht, um Strecken zu messen.
- Drehgeschwindigkeit Siehe *Winkelgeschwindigkeit*.
- Drehmoment Das *Drehmoment* ist wie die Kraft eine grundlegende physikalische Größe in der klassischen Mechanik. Es spielt für die Rotation die gleiche Rolle, wie die Kraft für die geradlinige Bewegung.
- Drehrate Die Rate, mit der sich ein Objekt dreht. Mittels der *Coriolis – Effektes* kann diese Drehung gemessen und daraus die Richtungsänderung abgeleitet werden. Siehe auch *Drehzahl*.
- Drehratensensor *Drehratensensoren* messen die Rotationsgeschwindigkeit eines Körpers. Durch Integration lässt sich daraus ableiten, um welchen Winkel sich ein Körper innerhalb einer Zeit gedreht hat.
- Drehzahl Die *Drehzahl* oder *Umdrehungsfrequenz* ist eine Größe, die bei, vorzugsweise mechanischen, Drehbewegungen die Häufigkeit der Umdrehungen angibt. Sie ist beispielsweise ein wesentliches Kennzeichen für Motoren.
- E112 Der um den *Minimaldatensatz* erweiterte, europaweit einheitliche Notruf 112 wird *E112* genannt.
- eCall Bei *eCall* handelt es sich um die von der Europäischen Union geplante Einführung eines *automatischen Notrufsystems* für Kraftfahrzeuge.
- Eigenortung *Ortung* durch das zu ortende System selbst.
- Elektromagnetische Wellen Als *elektromagnetische Welle* bezeichnet man eine Welle aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern.

- Ellipsoid Ein *Ellipsoid* ist die höherdimensionale Entsprechung einer Ellipse.
- Fahrassistenzsystem Systeme, die den Fahrer unterstützen, wie etwa ABS, ESP, Bremsassistent oder Spurhalteassistent.
- Faseroptischer Kreisel *Faseroptische Kreisel* nutzen den *Sagnac-Effekt*, um Drehbewegungen zu messen.
- Fremdortung *Ortung* durch ein entferntes System.
- Galileo *Galileo* ist der Name des europäischen *Satellitennavigationssystem*s.
- Geodäsie Die *Geodsie* ist die Wissenschaft von der Vermessung und der Abbildung der Erdoberfläche.
- Geographische Breite Die *geographische Breite* φ oder B (international abgekürzt mit Lat. oder LAT) ist die im Winkelmaß (also in Grad) angegebene nördliche oder südliche Entfernung eines Punktes der Erdoberfläche vom Äquator.
- Geographische Länge Die *geographische Länge*, λ , international mit long. abgekürzt, beschreibt eine der beiden Koordinaten eines Ortes auf der Erdoberfläche, und zwar seine Position östlich oder westlich einer definierten (künstlich festgelegten) Nord-Süd-Linie, des Nullmeridians.
- Global Positioning System *Global Positioning System (GPS)*, offiziell NAVSTAR GPS, ist ein globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung und Zeitmessung.
- GLONASS *GLONASS (Globales Satellitennavigationssystem)* ist ein Satellitennavigationssystem, das vom Verteidigungsministerium der Russischen Föderation betrieben wird.
- GNSS Ein *Globales Navigationssatellitensystem (engl. Global Navigation Satellite System)* oder GNSS ist ein System zur

Positionsbestimmung und *Navigation* auf der Erde und in der Luft durch den Empfang von Satellitensignalen und Signalen von Pseudoliten.

- Hall-Sensor Ein *Hall – Sensor* (auch Hall-Sonde oder Hall-Geber, nach Edwin Hall) nutzt den Hall-Effekt zur Messung von Magnetfeldern und elektrischen Strömen oder zur Lageerfassung.
- Heading Richtung, in die sich ein Fahrzeug bewegt. Bezugspunkt kann das vorherige *Heading* sein oder auch ein Koordinatensystem.
- Impulsgeber In Kraftfahrzeugen werden an unterschiedlichen Stellen *Induktionsgeber* (*Induktivgeber*, *Impulsgeber*) verwendet. Sie werden hauptsächlich an den Rädern als ABS-Drehzahlsensoren, als Drehzahl- und Bezugsmarkengeber am Schwungradzahnkranz und als berührungslose *Impulsgeber* in elektronischen Zündanlagen eingebaut.
- Integration Die Integralrechnung ist neben der Differentialrechnung der wichtigste Zweig der mathematischen Disziplin der Analysis. Sie entstand aus dem Problem der Flächen- und Volumenberechnung. Das *Integral* selbst ist eine lineare Abbildung, die einer Funktion einen Zahlwert oder eine Funktion zuordnet, je nachdem, ob ein konkreter oder ein unbestimmter Integrationsbereich betrachtet wird. Dieser Vorgang heißt *Integration*.
- Kartesisches Koordinatensystem Ein orthogonales Koordinatensystem.
- Kooperative Ortung *Ortung* wird in Kooperation des zu ortenden Systems und eines externen Systems durchgeführt.
- Kosinus Der Kosinus des Winkels α ist das Verhältnis seiner Ankathete zur Hypotenuse.
- Kreisbogen Der *Kreisbogen* ist Abschnitt eines Kreises.
- Laufzeit Unter der *Laufzeit* versteht man in der Elektrotechnik die zeitliche Differenz zwischen dem Eintritt eines Signals in ein (kausales)

- System und dem Austritt. Der Begriff des Systems ist hierbei sehr weit gefasst.
- Lichtwellenleiter *Lichtwellenleiter* (Abk.: LWL) oder *Lichtleitkabel* (LLK) sind aus Lichtleitern bestehende oder zusammengesetzte, teilweise konfektionierte, mit Steckverbindungen versehene Kabel und Leitungen zur Übertragung von Licht im sichtbaren sowie ultravioletten oder infraroten Bereich. *Lichtleitkabel* bilden mehr oder weniger stark biegsame Verbindungen zur Übertragung optischer Signale oder auch hoher optischer Strahlungsleistungen.
- Livedaten Im Gegensatz zu selbst erstellten Reifendaten, mit denen der Prototyp getestet wurde, handelt es sich bei *Livedaten* um Aufzeichnungen, die während der Fahrt in einem Fahrzeug gemacht wurden und somit Daten darstellen, die in einem *Notrufsystem* aufgezeichnet werden und im Rahmen der Berechnungen zur Verfügung stehen.
- Magnetisches Feld . . Magnetismus ist ein physikalisches Phänomen, das sich als Kraftwirkung zwischen Magneten, magnetisierten bzw. magnetisierbaren Gegenständen und bewegten elektrischen Ladungen wie z. B. in stromdurchflossenen Leitern äußert. Die Vermittlung dieser Kraft erfolgt über ein Magnetfeld, das einerseits von diesen Objekten erzeugt wird und andererseits auf sie wirkt.
- Magnetometer Ein *Magnetometer* (umgangssprachlich auch als Teslameter oder Gaußmeter bezeichnet) ist eine sensorische Einrichtung zum Messen von magnetischen Flussdichten.
- Manuelle Notruftaste Diese Taste dient der manuellen Auslösung eines *eCalls* und kann jederzeit, auch ohne Auslösung des Airbags, verwendet werden.
- Mathematisches Modell Das Modell für die Berechnung der Position eines Fahrzeuges auf Grund der Reifenbewegung, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde.

- Mechanischer Kreisel Ein *Kreiselinstrument* oder *Gyroskop* ist ein rasch rotierender, symmetrischer Kreisel, der sich in einem beweglichen Lager dreht.
- Mikroelektromechanischer Kreisel Der *mikroelektromechanische Kreisel* wird vorrangig aus polykristallinem Silizium (Polysilizium) hergestellt und ist nur wenige Mikrometer groß. Der Coriolis-Effekt wird bei diesem Kreisel angewandt, um Drehrichtungen zu bestimmen.
- Minimaldatensatz ... Bei einem *eCall* wird neben dem Anruf an sich auch noch ein Datensatz mitgeschickt, in dem unter anderem die Position und der Unfallzeitpunkt enthalten sind. Das Minimum an Daten, das mitgeschickt werden muss, wird im *Minimaldatensatz* beschrieben.
- Minimum Set of Data siehe *Minimaldatensatz*
- MNO siehe *Mobile Network Operator*
- Mobile Network Operator Mobilfunkanbieter
- MSD Minimum Set of Data, siehe *Minimaldatensatz*
- Navigation Die *Navigation* ist eine Anwendung der *Ortung*. Ein Teil davon ist die *Positionsbestimmung*. Hinzu kommen die Bestimmung des Zieles und der Strecke, die man zur Erreichung dieses Zieles fahren muss.
- Notrufsystem Ein *automatisches Notrufsystem* setzt einen *Notruf* selbständig ab, sobald ein bestimmter Auslöser betätigt wurde. Bei einem Auto wird hierfür der Airbag-Auslöser genutzt.
- Odometer Ein *Odometer* (von griech. *hodós*, „Weg“ und *métron*, „Maß“ – also: „Wegmesser“) misst mechanisch eine zurückgelegte Wegstrecke eines Fahrzeugs oder Fußgängers. Die Wissenschaft von der mechanischen Wegmessung ist die Odometrie.
- Odometrie *Odometrie* oder auch *Hodometrie* (von griech. *hodós*, „Weg“ und *métron*, „Maß“ - also: „Wegmessung“) ist die Wissenschaft von der

- Positionsbestimmung* eines mobilen Systems anhand der Daten seines Vortriebsystems.
- Ortung Die *Positions– oder Ortsbestimmung*, auch Verortung oder Lokalisierung, ist die Ermittlung des Ortes in Bezug zu einem gewissen Bezugspunkt (Bezugssystem). *Ortsbestimmung* im Speziellen ist die Bestimmung des eigenen Standortes, hingegen wird die *Bestimmung der Position* eines fernen Objektes *Ortung* genannt.
- Parallelogrammregel Die *Parallelogrammregel* drückt aus, dass die Summe zweier Vektoren \vec{PQ} und \vec{QR} den Vektor \vec{PR} ergibt.
- Piezoelektrischer Kreisel Im *piezoelektrischen Vibrationskreisel* wird ein auf Silizium basierender piezoelektrischer Kristall genutzt, anstatt einer beweglichen Komponente.
- Polarisation Die *Polarisation* einer Transversalwelle beschreibt die Richtung ihrer Schwingung. Ändert sich diese Richtung schnell und ungeordnet, spricht man von einer unpolarisierten Welle. Der Polarisationsgrad gibt den geordneten Anteil an. Bei der Ausbreitungsrichtung schwingender Wellen, sogenannter Longitudinalwellen, gibt es keine Polarisation.
- Polysilizium Polykristallines Silizium.
- Positionsbestimmung Die *Positionsbestimmung* ist eine Anwendung der *Ortung*. Hierbei wird die *Position* eines Objektes bestimmt.
- Präzession Die *Przession* ist allgemein die Richtungsänderung der Achse eines rotierenden Körpers, wenn äußere Kräfte ein Drehmoment auf ihn ausüben. Speziell in der Astronomie ist damit die Richtungsänderung der Erdachse gemeint, die eine Folge der Massenanziehung des Mondes und der Sonne in Verbindung mit der Abweichung der Erdfigur von der Kugelform ist.
- PSAP siehe *Public Safety Answering Point*
- Public Safety Answering Point Notrufzentrale

- Pulse Ein Messpunkt, der auf einem Reifen erkannt und gezählt wird, produziert einen so genannten *Puls*. In diesem Kontext sind die Begriffe Messpunkt und Puls als äquivalent betrachtbar.
- Radpulse Bei der Umdrehung eines Reifens werden in äquidistanten Zeitabständen Pulse ausgesandt, die aufgezeichnet werden. Für einen Reifen ist bekannt, wie viele Pulse gesandt werden, bis eine vollständige Umdrehung abgeschlossen ist.
- Reed-Kontakt / Schutzgaskontakt Ein Reed-Relais ist ein Relais zum Schalten eines Stromkreises, welches mit einem *Reed – Kontakt* arbeitet. Reed-Schaltkontakte sind unter Vakuum oder Schutzgas in einen Glaskolben eingeschmolzene Kontaktzungen, die zugleich die Kontaktfeder und den Magnetanker bilden. Der Name stammt vom Rohrblatt der Holzblasinstrumente, engl. reed, das den schwingenden Kontaktzungen ähnelt.
- Reifendaten Aufzeichnungen, die vom *Pulsgeber* am Reifen gemacht werden.
- Richtungsbestimmung Bestimmung der Richtung, in die ein Objekt ausgerichtet ist.
- Ring-Laser-Kreisel .. *Ring-Laser-Kreisel* nutzen den *Sagnac-Effekt*, um Drehbewegungen zu messen.
- Rotationshyperboloid Das *Rotationshyperboloid* ist eine Fläche zweiter Ordnung, die man sich durch Rotation einer Geraden um eine zu ihr windschiefe Gerade (Achse) entstanden vorstellen kann. Das *Rotationshyperboloid* ist ein Spezialfall des einschaligen Hyperboloids. Seine Gauß'sche Krümmung ist in jedem Punkt negativ; es handelt sich also um eine antiklastisch gekrümmte Fläche.
- Sagnac-Effekt Ein 1913 von Georges Sagnac (1869–1926) entdeckter Effekt. Er beobachtete, dass zwischen kohärentem Licht, das im Uhrzeigersinn, und Licht, das im Gegenuhrzeigersinn über Spiegel auf derselben Strecke im Kreis gelenkt wird, eine Phasenverschiebung auftritt, solange man die gesamte Apparatur dreht. Er deutete

- diese Beobachtung als Nachweis der Existenz des Lichtäthers. Sie lässt sich jedoch auch im Rahmen der Relativitätstheorie erklären.
- Schlupf *Schlupf* bezeichnet im Allgemeinen das Abweichen der Geschwindigkeiten miteinander in Reibkontakt stehender mechanischer Elemente oder Fluide unter tangentialer Belastung. Ohne Formschluss ist *Schlupf* die Voraussetzung für Energieübertrag. Auch umgekehrt gilt: Ohne Energieübertrag kein Schlupf.
- Schwerevektor Der *Schwerevektor* ist der Gradient des Schwerepotentials.
- Service Provider Diensteanbieter, etwa für zusätzliche Informationen, die bei einem *eCall* benötigt werden
- Sinus Der Sinus des Winkels α ist das Verhältnis seiner Gegenkathete zur Hypotenuse.
- Skalarprodukt Das *Skalarprodukt* ist eine Rechenoperation, die auf *Vektoren* definiert ist.
- SP siehe *Service Provider*
- Spurbreite Auch *Spurweite* genannt. Entfernung von der Mitte des linken Reifens zur Mitte des rechten Reifens.
- Spurweite Auch *Spurbreite* genannt. Entfernung von der Mitte des linken Reifens zur Mitte des rechten Reifens.
- Standfläche All die Punkte, an denen der gleiche Betrag für eine Messgröße (bei der *Ortung*) ermittelt wird, befinden sich im Raum auf einer Fläche, die *Standfläche* genannt wird.
- Standpunkt Der *Schnittpunkt* mehrerer *Standflächen* ergibt den *Standpunkt*.
- Strahlteiler Ein *Strahlteiler* ist ein optisches Bauelement, das einen einzelnen Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen trennt. Durch diese Eigenschaft wird der *Strahlteiler* unter anderem zum zentralen Bauelement unterschiedlicher Interferometertypen.

-
- systematische Fehler Fehler, die im System stecken und bei gleicher Messung immer wieder in gleicher Weise auftreten.
- Translatorische Beschleunigung Eine *Translation* (auch *reine Translation*) ist eine Bewegung, bei der sich alle Punkte des bewegten Körpers in dieselbe Richtung bewegen. Der Körper bewegt sich somit geradlinig, seine Geschwindigkeit heißt Translationsgeschwindigkeit.
- Triangulation Die *Triangulation* (Aufteilen einer Fläche in Dreiecke) ist das klassische Verfahren zur Erstellung eines trigonometrischen Netzes als Dreiecksnetz für die Zwecke der Erdmessung, der Landesaufnahme sowie als Grundlage für weitere Vermessungsarbeiten.
- Trigonometrische Funktionen *Trigonometrische Funktionen* sind Funktionen, die die Zusammenhänge zwischen einem Winkel und den Seitenverhältnissen beschreiben. Siehe hierzu auch *Sinus* und *Kosinus*.
- Trilateration Lateration (lat. lateral = seitlich) oder *Trilateration* ist ein Messverfahren zur *Positionsbestimmung* eines Punktes. Während die *Triangulation* mit Winkelmessung arbeitet, beruht die *Lateration* auf Entfernungs- bzw. Abstandsmessungen.
- Vektor Ein *Vektor* ist in der Mathematik eine gerichtete Verbindung von einem Punkt A zu einem Punkt B.
- Verschiebungsvektor *Vektor*, der einen Punkt an eine andere Stelle verschiebt. Der *Vektor*, der von Punkt P zu Punkt P' zeigt, ist ein *Verschiebungsvektor*.
- Verschiebungsvektor Ein *Verschiebungsvektor* verschiebt einen Punkt P an den Punkt P'.
- Weglängenbestimmung Bestimmung der Länge eines Weges, den ein Objekt zurück gelegt hat.
- WGS84 Das World Geodetic System (abgekürzt WGS) ist ein globales Referenzsystem der Geodäsie und Navigation. Unter WGS wird

heute meist das sogenannte WGS 84 verstanden, das derzeit am weitesten verbreitete globale Referenzsystem.

Winkelgeschwindigkeit Unter der *Winkel- oder Rotationsgeschwindigkeit* ω versteht man bei einer Kreisbewegung (Rotation) den überstrichenen Winkel φ pro Zeit t . Die *Winkelgeschwindigkeit* gibt an, wie schnell etwas um den Ursprung rotiert.

Winkelsumme Die Summe der Winkel in einem Dreieck ergibt immer 180° .

Zeitstempel Zeitpunkt, zu dem eine Messung durchgeführt wird, wie etwa die Ermittlung der *Reifenpulse* zwischen zwei Zeitpunkten.

zufällige Fehler Fehler, die zufällig auftreten und auch bei wiederholter Messung nicht erkannt werden können.

Stichwortverzeichnis

- Abbiegungswinkel, 32, 39, 43, 54, 63, 80
Abschattung, 19
Absolutwert, 49
Abweichung, 77, 81, 82
Achse, 34, 37
Airbag, 6
Alternierendes Ignorieren, 74
Ankathete, 27
Anti-Blockier-System, 6
Antriebsschlupf, 67
Antwortzeit, 10
Approximation, 84
Auflösung, 59, 61, 63, 66, 72
Auflösungsvermögen, 58
Aufzeichnung, 57, 61, 79
Aufzeichnungsfrequent, 76
Aufzeichnungsfrequenz, 49, 59, 72
Ausgangsachse, 24
Auslenkung, 24
Ausreißer, 83
Automatische Abstandregelung, 6
Autonome Ortung, 13
Autonome Selbstlokalisierung, 12
Beispielstrecke, 52
Berechnungsintervall, 40
Beschleunigung, 67
Beschleunigungsmesser, 25
Bezugssystem, 24
Bogenmaß, 37
Bremsassistent, 6
Bremschlupf, 67
Coriolis-Effekt, 25
Counterfehler, 73, 75, 76
Crash-Sensor, 9, 10
Detektor, 24
Differential-Odometer, 24
Doppler-Effekt, 22
Doppler-Radar, 22
Drehachse, 24
Drehbewegung, 24
Drehgeschwindigkeit, 24
Drehmatrix, 41
Drehmoment, 24
Drehrate, 23
Drehratensensoren, 23
Drehrichtung, 24
Drehung, 41
Drehzahl, 24
Dreieck, 27
Driftverhalten, 23
E112, 7
eCall, 5–7, 10, 80
eCall-Memorandum, 8

- eCall-Verordnung, 9
- Echtzeit, 14
- Echtzeitanforderung, 14
- Eigenortung, 13
- Einfaches Ignorieren, 73, 74
- Eingangssachse, 24
- Einweg-Methode, 17
- Elektromagnetische Wellen, 17
- Ellipsoid, 15
- Entfernungsänderung, 18
- Entfernungsdifferenz, 18
- Ergebnisse, 82
- Erwartungswert, 82
- EU-Mitgliedsstaaten, 6, 7
- Euklidischer Raum, 41
- Europäische Kommission, 6, 7, 9
- Evaluation, 71

- Fahrassistenzsystem, 6
- Fahrdynamikregelung, 6
- Fahrtrichtung, 31, 35, 63
- Fahrzeugachse, 40, 75
- Fahrzeughersteller, 6
- Faseroptischer Kreisel, 24
- Faserspulenebene, 24
- Fehlerindikator, 48
- Fehlerquellen, 71, 81
- Fehlmessung, 78
- Fluktuationen, 58
- Fremdortung, 13
- Frequenzbänder, 20

- Galileo, 19
- Gefälle, 68
- Gegenkathete, 27
- Genauigkeit, 83

- Geographische Breite, 12
- Geographische Länge, 12
- Gerade, 33, 77
- Geschwindigkeitsbestimmung, 60
- gewichteter Mittelwert, 78
- Glättung minimaler Pulsunterschiede, 76
- globale Referenz, 85
- GLONASS, 18, 19
- GNSS, 20
- GPS, 5, 6, 13, 18, 19, 31, 80, 84
- GPS-Empfänger, 9
- GPS-Signal, 66
- GSM-Antenne, 9

- Höhe, 12
- Höhenunterschied, 66, 68
- Heading, 31, 39, 42, 43
- Hinterachse, 34, 75
- Hypotenuse, 27

- Ignorieren unter Einbeziehung von Kurven, 74
- Impulsgeber, 21
- Inkrementalgeber, 60
- Interpolation, 58
- Intervall, 32, 49, 62, 74, 77
- Intervalllängen, 49

- Kalibrierung, 66
- kartesisches Koordiantensystem, 51
- Kartesisches Koordinatensystem, 35
- Komplementärwinkel, 43
- Kooperative Ortung, 13, 15
- Kooperative Ortungssysteme, 18
- Koordinaten, 7, 37
- Koordinatensystem, 31, 40, 41
- Kosinus, 27, 37, 38

- Kreisbogen, 35, 77
 Kreisel, 25
 Kugeloberfläche, 16
 Kurve, 33
 Kurvenabschnitte, 77
 Kurvenradius, 38, 54
- Längenbestimmung, 60, 62
 Laser, 25
 Laufzeiten, 17
 Lichtemittierenden Superluminiszenzdiode, 24
 Lichtquelle, 58
 Lichtstrahl, 58
 Lichtwellenleiter, 24
 Linkskurve, 36
- Magnetisches Feld, 24
 Magnetometer, 23
 Manuelle Notruftaste, 9
 Mathematica, 51
 Mathematisches Modell, 31
 Mechanischer Kreisel, 24
 Messdaten, 32
 Messfehler, 76
 Messinstrument, 58
 Messintervall, 50
 Messpunkt, 50, 60
 Messskala, 58
 Messung, 59
 Messvorgang, 72
 Mikroelektromechanischer Kreisel, 25
 Mindestintervalldauer, 84
 Mindestpulszahl, 76, 77, 83, 84
 Minimaldatensatz, 6, 7
 minimale Pulsunterschiede, 73, 83
- Minimum Set of Data, 7
 MNO, 10
 Moment, das, 24
 MSD, 7
- Navigation, 24
 Navigationssystem, 12, 18
 Notruf, 6, 7, 9
 Notrufnummer 112, 7
 Notrufsystem, 5, 12, 18, 19, 31, 45
 Notrufzentrale, 7
 Notstromversorgung, 9
- Odometer, 21, 24, 61, 63, 64, 67, 71
 Odometrie, 45, 46, 51, 57, 79, 84
 Odometriedaten, 71
 Odomter, 58
 Ortung, 5, 12
 Ortungsmittel, 13
- Parallelogrammregel, 26
 Parameter, 79
 Parameterwahl, 81, 84
 Piezoelektrischer Kreisel, 25
 piezoelektrischer Kristall, 25
 Polarisierung, 24
 Polysilizium, 25
 Polysilizium-Masse, 25
 Position, 10, 12
 Positionsbestimmung, 5, 19, 31, 33, 45, 68, 85
 Positionsfehler, 67
 Positionssignal, 7
 Positionsveränderung, 31, 34, 40, 42, 47
 Präzession, 24
 Prototyp, 44, 45, 52, 55, 71, 78
 PSAP, 9

- Pulsüberschuss, 75
- Pulse, 73
- Pulsfehler, 73
- Pulsunterschied, 74
- Pulsunterschiede, 75
- Pulszahl, 75

- Radpuls, 50
- Rauschen, 58
- Reaktionszeit, 7
- Rechtskurve, 36
- Referenz, 79
- Referenzstrecke, 82
- Reifenbewegung, 31
- Reifendaten, 32, 45, 48, 50, 56, 89
- Reifendruck, 67
- Reifendurchmesser, 62
- Reifenerwärmung, 51
- Reifenpuls, 64
- Reifenpulse, 48
- Reifenumfang, 50, 61, 65
- Rekonstruktion, 50
- Rettungsdienst, 7
- Rettungskräfte, 85
- Richtungsänderung, 24, 25
- Richtungsbestimmung, 21
- Ring-Laser-Kreisel, 25
- Rotationshyperboloid, 15, 18
- Rotor, 24

- Sagnac-Effekt, 24, 25
- Satelliten, 19
- Satellitenortung, 13, 18
- Schleife, 24
- Schlupf, 67
- Schwankung, 78

- Schwingdraht, 25
- Sensoren, 9, 21
- Sinus, 27, 37, 38
- Skalarprodukt, 27, 42
- SP, 10
- Sprachverbindung, 8
- Spurbreite, 38, 48
- Spurhalteassistent, 6
- Spurweite, 32, 36, 50, 52, 88
- Standfläche, 15
- Standlinie, 16
- Standpunkt, 15
- Stauchung, 65
- Steigung, 68
- Strahlteiler, 24
- Streuungsparameter, 82
- systematische Fehler, 57, 60

- Teilstrahlen, 25
- Terme, 24
- Testaufzeichnung, 79
- Testdaten, 55, 66
- Teststrecke, 78
- timeslot, 49
- Triangulation, 16
- Trigger, 6
- Trigonometrische Funktionen, 37
- Trilateration, 16

- Umfang, 50, 61
- Umlaufbahnen, 19
- Unfallfolgeverletzung, 6
- UTM-Koordinatensystem, 80

- Varianz, 82, 84
- Vektor, 26, 37, 41, 42
- Vektorlänge, 27

Vergleich mit der zweiten Achse, 75
Verkehrsunfall, 6
Verschiebungsvektor, 26, 35, 36, 51
Verzögerung, 49, 68
Vibrationskreisel, 25
Vorderachse, 34, 36
Vorverarbeitung, 71, 78, 79, 82

Weglängenbestimmung, 21
Winkel, 26, 41, 42
Winkelbestimmung, 60
Winkelgeschwindigkeit, 23
Winkelsumme, 42
Winkelungenauigkeit, 62

Zeitstempel, 64
zufällige Fehler, 57, 67
Zweiweg-Methode, 17
Zylinder, 25