

Diplomarbeit

Standortbestimmung basierend auf kartographischen Daten mittels GPS und zusätzlichen physikalischen Ortungssensoren

Die vorliegende Arbeit entstand bei der
INIT-GmbH
unter Betreuung von
Dipl.-Math. Alois Fuchs

Die Betreuung an der
Fachhochschule Karlsruhe
erfolgte durch
Prof. Dr. rer. nat. Karl-Heinz Meisel

Wolfgang Becker
Wintersemester 2003/04

Danksagung

Besonders bedanken möchte ich mich bei den beiden Betreuern meiner Diplomarbeit, Herrn Dipl.-Math. Alois Fuchs bei der INIT-GmbH und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Karl-Heinz Meisel an der Fachhochschule Karlsruhe.

Des weiteren danke ich allen Kolleginnen und Kollegen bei der INIT für ihre Unterstützung.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Karlsruhe, im Februar 2004

Wolfgang Becker

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Eidesstattliche Erklärung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	6
Abstract	7
1 Einleitung	8
1.1 Systemumfeld	8
1.1.1 Firma INIT	8
1.1.2 Copilot PC Bordrechner	8
1.2 Aufbau der Diplomarbeit	10
2 Verfahren zur Positionsbestimmung	11
2.1 Ortungsverfahren des Copilot Bordrechners	11
2.1.1 Bisherige Ortung mit GPS	11
2.1.2 Logische Ortung	11
2.1.3 Grenzen und Probleme des bisher verwendeten Verfahrens	12
2.2 PKW-Navigationssystem	12
3 Aufgabenstellung	14
4 Systementwurf	15
4.1 Positionsbestimmung durch Sensoren	15
4.1.1 Streckenbestimmung über Wegimpuls	15
4.1.2 Richtungsbestimmung aus Lenkradeinschlag	15
4.1.3 Richtungsbestimmung mit Drehratensensor	16
4.1.4 Strecke und Richtung	16
4.1.5 Beschleunigungssensor	16

4.1.6	Bewertung der Sensorverfahren	17
4.2	Satellitengestützte Positionsbestimmung	17
4.2.1	Global Positioning System (GPS)	17
4.2.2	Differential GPS (DGPS)	19
4.2.3	Global Navigation Satellite System (GLONASS)	20
4.2.4	Galileo	20
4.2.5	Das NMEA-Datenformat	20
4.2.6	Bewertung satellitengestützter Verfahren	21
4.3	Mobiltelefone	21
4.3.1	Bestimmung der Funkzelle	21
4.3.2	Enhanced Observed Time Difference (EOTD)	21
4.3.3	Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)	21
4.3.4	Bewertung Handyortung	22
4.4	Ortsbaken	22
4.5	Verfügbare Kombisysteme	22
4.5.1	Antaris SBR-LS	23
4.5.2	Navigates NGH-200	25
4.5.3	Testfahrten mit den Kombisystemen	25
4.5.4	Bewertung der Kombisysteme	28
4.6	Stützung durch Kartendaten	28
4.6.1	Bekannte Streckenlänge	28
4.6.2	Vektorkarten	28
4.6.3	Kartendaten auf dem Fahrzeug	29
4.6.4	Bewertung Kartendaten	29
4.7	Gesamtsystem	29
5	Implementierung	30
5.1	Vektorkarte	30
5.1.1	Aufbereitung der Kartendaten	30
5.1.2	Kachelauswahl zur Straßensuche	33
5.2	Module	34
5.2.1	Anzeige von Positions- und Kartendaten – NxGpsDrawMap	34
5.2.2	Kommunikation mit der GPS-Hardware – NxGpsDevice	35
5.2.3	Auswertung von GPS-Telegrammen – NxGpsDeviceNmeaTele	35
5.2.4	Verteilung von GPS-Telegrammen – NxGpsImp	35
5.2.5	Verteilung verbesserter GPS-Telegrammen – NxGpsMapImp	36
5.2.6	Kartendaten – NxMap	36

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	5
5.3 Abstand zur Straße	36
5.4 Berechnung des Kurswinkel	38
5.5 Verbesserungsalgorithmus für die Positionsbestimmung	38
5.5.1 Verbesserung auf die nächste Straße	38
5.5.2 Verfolgung der Richtungsänderung	39
5.5.3 Straßenauswahl bei bekanntem Kurswinkel	40
5.5.4 Kombiniertes Verfahren	42
5.6 Bewertung des Verbesserungsalgorithmus	44
6 Ergebnisse	45
7 Ausblicke	46
Tabellenverzeichnis	47
Abbildungsverzeichnis	48
Literaturverzeichnis	49

Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit untersucht Verfahren zur Standortbestimmung von Fahrzeugen, die in Kombination mit einem Bordrechner der Firma INIT verwendet werden können. Zunächst wird das bestehende Verfahren zur logischen Ortung mittels Wegimpulsen vorgestellt. Verschiedene Sensorverfahren werden untersucht.

Im Bereich Satellitensysteme gibt es zur Zeit keine Alternative zum GPS-System, da das russische GLONASS in der zivilen Version deutlich ungenauer ist und das europäische Galileo-System voraussichtlich erst 2008 in Betrieb geht. Absolute Positionsbestimmung mittels Lokalisierung von Mobiltelefonen ist selbst in einem engmaschigen Funknetz deutlich ungenauer als GPS.

Die Firma u-Blox bietet eine Kombilösung für Koppelnavigation mit GPS und Sensoren an. Bei Ausfall des GPS-Empfangs wird die aktuelle Position anhand der Messung des Wegimpulses und eines Drehratensensors bestimmt. Die Positionsmessung wird als NMEA-Telegramm ausgegeben.

Um eine weitere Positionsverbesserung zu erreichen, wird eine Stützung mit Kartendaten auf dem Bordrechner realisiert. Aufgrund von Versuchen wurde eine geeignete Aufteilung der Straßendaten in Kacheln bestimmt, um eine schnelle Suche in den Daten zu ermöglichen und trotzdem wenig Speicher zu verbrauchen.

Verschiedene Verbesserungsverfahren wurden implementiert und bewertet. Die grafische Anzeige der gemessenen und verbesserten Positionen ermöglicht eine einfache Auswertung der Wirkung der Verbesserungsfunktion. Aufgrund der Testergebnisse wird eine Auswahl der geeignetsten Verbesserungsfunktion je nach Zustand ermöglicht.

Kartenstützung zusammen mit der Hardwarelösung zur genaueren GPS-Ortung führt zu einer deutliche Verbesserung der Positionsbestimmung. Auch ohne zusätzliche Sensoren wird mit Hilfe der Kartenstützung einer Verbesserung der Positionsbestimmung erzielt.

Abstract

This diploma thesis examines procedures of position reckoning, which have been implemented on a vehicle on-board computer made by INIT. First the original method for dead reckoning using the odometer signal is described. Several sensor-based methods were examined.

At the moment there is no alternative for the GPS-system. The civilian version of the Russian GLONASS is much less precise and the European Galileo-System will not be operational before 2008. Absolute position reckoning by locating cellular phones is not an option because it is less precise than GPS, even in areas with good radio coverage.

The Swiss company u-Blox offers a combined solution for dead reckoning based on GPS, a gyrosensor and an odometer signal. Without GPS-reception the current location is calculated from the values of the odometer signal and the gyrosensor.

Measured positions are transmitted to the on-board computer as NMEA-telegrams. To further increase the accuracy of the location tracking, the values are supported by map data. According to experiments a suitable partitioning of the roadmap data in tiles was implemented to allow a fast search in the data while keeping a low memory profile.

Several improvement methods have been tested. A graphical representation of the data allows a simple evaluation of these methods. According to the test results the best improvement method for each situation is selected.

By using the map support, the position reckoning is improved even without additional sensors. Map support together with a sensor enhanced GPS-receiver results in a significant increase in accuracy of the position reckoning.

Kapitel 1

Einleitung

Eine genaue Bestimmung des physikalischen Standorts von Fahrzeugen wird für eine große Zahl von Telematikanwendungen benötigt. Die Positionsbestimmung nur durch das globale Satellitennavigationssystem GPS ist nicht immer genau genug möglich, da der Satellitenempfang in Straßenschluchten, Waldstücken, sowie unter Brücken und in Tunneln beeinträchtigt ist.

1.1 Systemumfeld

1.1.1 Firma INIT

Die Firma INIT bietet Telematik- und Zahlungssysteme für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) an. Das Unternehmen, das heute über 200 Mitarbeiter hat wurde 1983 gegründet.

Zur Produktpalette der INIT gehören Bordrechner, Fahrgastzählsysteme, Fahrkartenautomaten, Fahrscheindrucker an Bord und für den Vorverkauf, rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL), Funkkommunikation sowie Planungswerkzeuge für Fahrpläne und den Fahrzeug- und Personaleinsatz. Abbildung 1.1 zeigt eine Übersicht über das Zusammenspiel dieser Produkte.[1]

1.1.2 Copilot PC Bordrechner

Der praktische Teil dieser Diplomarbeit wird auf dem Copilot-PC, der neusten Generation des INIT Bordrechners implementiert. [2]

Der Copilot PC ist ein Bordrechner für den Personennahverkehr. Er übernimmt Aufgaben wie das Einstellen von Zielanzeigen, Datenfunkkommunikation mit der Leitstelle oder die Steuerung der Fahrscheindrucker.

Sowohl im Fahrzeug selbst, als auch in der Leitstelle ist es oft wichtig, die genaue Position des Fahrzeugs zu kennen. Hierfür übermittelt der Bordrechner die notwendigen Informationen an die Leitstelle.

Der Copilot PC basiert auf einem x86 Prozessor, auf dem das Betriebssystem „Windows XP embedded“ läuft. Zur Softwareentwicklung wird der „Visual C++ Compiler“ von Microsoft verwendet. Die Entwicklung ist auf einem Standard-PC möglich. Für die Programmierung des Copilot-PC stellt die Nixe-Bibliothek Schnittstellen zur Hardware sowie Simulationsmöglichkeiten zur Fehlersuche bereit. Bei dieser Bibliothek handelt es sich um eine Eigenentwicklung der INIT, die genau auf die Anforderungen des Bordrechners zugeschnitten ist.

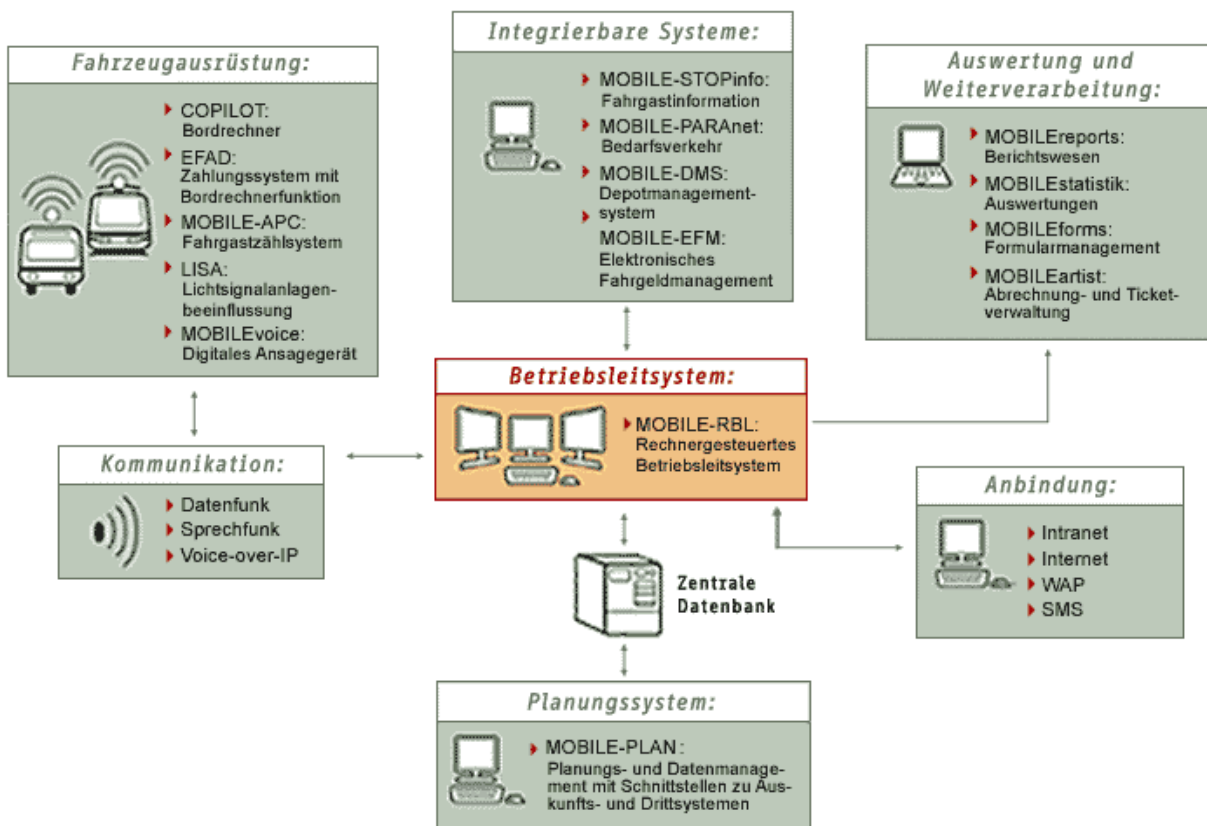


Abbildung 1.1: Übersicht über das Produktspektrum der Firma INIT (aus [1])

1.2 Aufbau der Diplomarbeit

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die bisher bei der INIT eingesetzten Ortungsverfahren.

In Kapitel 3 wird die konkrete Aufgabenstellung dieser Arbeit erläutert.

Einen Überblick über verschiedenen Sensoren und Verfahren zur Ortungsverbesserung liefert Kapitel 4.

Die Implementierung der Kartenstützung wird in Kapitel 5 beschrieben.

Kapitel 6 zeigt die Ergebnisse dieser Arbeit auf und in Kapitel 7 wird auf möglicher Erweiterungen des Programms eingegangen.

Kapitel 2

Verfahren zur Positionsbestimmung

Diese Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik und es werden bereits eingesetzte Verfahren zur Positionsbestimmung vorgestellt.

2.1 Ortungsverfahren des Copilot Bordrechners

Der Bordrechner ist in der Lage, seine Position auf einer vorgegebenen Route zu bestimmen. Die Abstände zwischen den Haltestellen sind bekannt. Beim Fahrtbeginn auf einer Linie wird von der Starthaltestelle aus die Position über Wegimpulse verfolgt. Mit Ortsbaken kann die Genauigkeit der Positionierung noch erhöht werden. An die Leitstelle wird die letzte Haltestelle und die zurückgelegte Strecke auf dem Weg zur nächsten Haltestelle übermittelt. Es gibt Projekte, in denen der Copilot mit einem GPS-Empfänger ausgestattet ist. Gemessene GPS-Koordinaten können an die Leitstelle übertragen werden. Bis jetzt werden die Daten vom GPS-Empfänger unkorrigiert übernommen.

2.1.1 Bisherige Ortung mit GPS

Es sind Koordinaten von Punkten, beispielsweise von Haltestellen, im Bordrechner gespeichert. Die Annäherung an einen solchen Punkt ist erkennbar. Es wird der Abstand zwischen der aktuellen Position und der im Rechner hinterlegten Position berechnet. Sobald der Abstand unter einen gewissen Schwellwert fällt gilt die Position als erreicht. Die Fahrzeugposition liegt dann im sogenannten Einfangkreis um die Position. Um kleine Sprünge der vom GPS Empfänger gelieferten Koordinaten auszugleichen gibt es ein weiteres Verfahren zur Positionsbestimmung. Eine Position gilt als passiert, wenn der Abstand zum Punkt kleiner ist, als ein gewisser Schwellwert und der Abstand wieder größer wird. [3]

Im Moment liefert GPS eine auf etwa 10m genaue Ortung, da die künstliche Verschlechterung seit Mai 2000 deaktiviert ist. Dadurch können die Einfangkreise kleiner gewählt werden, als es vorher erforderlich war.

2.1.2 Logische Ortung

Die logische Ortung nutzt bisher hauptsächlich den Wegimpuls zur Streckenmessung. Dazu kommen Ortsbaken, um das Erreichen wichtiger Punkte, wie zum Beispiel die Anmeldepunkte vor Kreuzungen zur Lichtsignalbeeinflussung, exakt zu bestimmen.

Bei der logischen Ortung wird die gefahrene Strecke über den Wegimpuls beobachtet, und mit anderen Ereignissen synchronisiert. Werden die Türen der Fahrzeugs geöffnet, so wird dies als Kriterium für das Erreichen einer Haltestelle verwendet. Damit das Fahrzeug in der Ortung automatisch auf die Haltestelle positioniert werden kann, darf die Wegstrecke jedoch nicht zu sehr abweichen. Nach einer längeren Umleitung, beispielsweise wegen einer Baustelle, ist eine manuelle Positionierung des Fahrzeugs erforderlich.

Dieses Verfahren kann mit GPS unterstützt werden, indem zusätzlich zu den Wegstrecken GPS-Koordinaten gespeichert werden. Das Erreichen dieser Punkte kann, wie im Abschnitt 2.1.1 beschrieben, erkannt werden.

2.1.3 Grenzen und Probleme des bisher verwendeten Verfahrens

Für Schienenfahrzeuge reicht häufig eine eindimensionale Positionsbestimmung über die Wegstrecke, da sie ihre Route nicht verlassen. Für Busse, die auf festgelegten Wegen unterwegs sind, ist dieses Verfahren ebenfalls oft ausreichend. Mit diesem Verfahren ist es aber nicht möglich, ohne eine Positionierung zu Beginn einer Fahrt den Standort des Fahrzeugs zu bestimmen. Die Positionierung erfolgt meist manuell dadurch, dass sich der Fahrer für eine bestimmte Fahrt anmeldet, oder durch eine Ortsbake am Einsatzpunkt.

Bei Verlassen der vermessenen Route durch Baustellen, Umleitungen oder aus anderen Gründen funktioniert die Positionsbestimmung nur über die Wegstrecke nicht. Beim Tür-zu-Tür-Transport im Ruftaxibetrieb ohne feste Haltestellen ist das bisherige Verfahren mangels fester Route ebenfalls nicht einsetzbar.

Positionsbestimmung nur mittels GPS-Daten ist nicht überall zuverlässig möglich, da der Empfang des Satellitensignals nicht immer gewährleistet ist.

2.2 PKW-Navigationssystem

Die besseren Navigationssysteme für PKW verwenden Koppelnavigation¹ zusätzlich zum GPS-Empfänger. Es ist ihnen auch bei gestörtem GPS-Empfang möglich, die Fahrzeugposition zu bestimmen. Dazu werden Richtung und Geschwindigkeit mit Sensoren erfasst, und der aktuelle Standort wird durch Koppelung der gemessenen Vektoren ausgehend von einem bekannten Standort bestimmt.

Zudem sind PKW-Navigationssystem in der Lage, die beste Route zum gewählten Ziel zu finden, und den Fahrer dorthin zu lotsen.

Bei Verwendung eines fertigen Navigationssystems ist eine Hardwareaufrüstung nötig. Ein komplettes, am Markt erhältliches Navigationssystem benötigt einen eigenen Rechner und einen eigenen GPS-Empfänger. Oft verfügt ein solches System nicht über Schnittstellen, um Standortinformationen auszulesen. Eine Aktualisierung der Kartendaten oder der Software in einem externen System ist aufwendig. Die bestehenden Mechanismen des Copilots erlauben es zwar, neue Daten auf den Bordrechner zu übertragen, aber ohne die Entwicklung einer speziell auf das externe Navigationssystem angepassten Zusatzsoftware ist der Bordrechner nicht in der Lage, diese Daten weiterzuleiten.

Zur Vermeidung redundanter Systeme, und den dadurch entstehenden Kosten, soll die benötigte Funktionalität auf dem Copilot PC realisiert werden. Der Softwareteil, die Positionsverbesserung mit Kartendaten, ist auch ohne neue Sensorhardware verwendbar, funktioniert dann

¹engl. „dead reckoning navigation“.

aber weniger zuverlässig. Benötigt wird kein vollständiges Navigationssystem, sondern eine exakte Positionsbestimmung. Weder eine Routenplanung noch ein Fahrerassistenzsystem wird benötigt.

Kapitel 3

Aufgabenstellung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die absolute Position eines Fahrzeugs zu bestimmen. Die Standortbestimmung soll auch bei unzureichendem Satellitenempfang möglich sein.

Zunächst ist der Stand der Technik zu ermitteln. Es soll eine Bewertung der verfügbarer Sensoren und Ortungsverfahren erstellt werden, anhand derer dann die zur Positionsbestimmung geeignetste Methode auszuwählen ist. Es muss ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit und den damit verbundenen Kosten gefunden werden.

Die von den Sensoren gelieferten Messwerte sind zu analysieren. Zur Positionsverbesserung sollen neben GPS- und Sensormessung auch Daten über das Streckennetz eingesetzt werden. Aufgrund der Netzdaten und der Messwerte soll ein Konzept zur verbesserten Positionsbestimmung auf dem Bordrechner entwickelt werden.

Im praktischen Teil ist ein Prototyp einer Software zu erstellen, die dieses Konzept anwendet. Die Software muss in der Lage sein, gemessene Positionen in Echtzeit zu verbessern. Abschließend ist das erstellte System zu bewerten.

Kapitel 4

Systementwurf

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten zur Positionsbestimmung.

4.1 Positionsbestimmung durch Sensoren

Durch Messung des zurückgelegten Weges bei gleichzeitiger Bestimmung der Fahrtrichtung kann die relative Position des Fahrzeugs zum vorherigen Standort bestimmt werden. Es sind fahrzeuginterne Messungen, die ohne externe Quellen auskommen.

4.1.1 Streckenbestimmung über Wegimpuls

Das Fahrzeug liefert bei jeder Radumdrehung sogenannte Tacho- oder Wegimpulse. Das Wegimpulssignal im Fahrzeug ist normalerweise schon am Bordrechner angeschlossen. Über dieses Signal wird die zurückgelegte Wegstrecke bestimmt. Aus der Wegstrecke kann unter Zuhilfenahme einer Zeitmessung die Geschwindigkeit des Fahrzeugs berechnet werden.

Fehlerquellen sind neben ungenauer Kalibrierung auch Reifenschlupf bei Antriebsrädern, unterschiedlicher Reifendruck und dadurch etwas abweichender Radumfang sowie unebene Straßen. Bei sorgfältiger Kalibrierung wirken sich die anderen Fehlerquellen jedoch kaum aus. Der Fehler bei der Wegstreckenmessung liegt zwischen 1% und 3%. Es ist nicht möglich, aus dem Wegimpuls zu erkennen, ob das Fahrzeug vorwärts oder rückwärts fährt.

4.1.2 Richtungsbestimmung aus Lenkradeinschlag

Durch Messung des Lenkradeinschlag kann eine Änderung der Fahrtrichtung erkannt werden. Zusätzlich zum Lenkradeinschlag muss die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bekannt sein. Bei stehendem Fahrzeug erfolgt auch bei großem Lenkradeinschlag keine Richtungsänderung.

Die zur Messung des Lenkradeinschlag erforderlichen Sensoren müssen nachgerüstet werden. Nur bei manchen PKW mit fest eingebautem Navigationssystemen sind sie bereits vorhanden. Ein nachträglicher Einbau dieser Sensoren ist, da sie an schwer zugänglicher Stelle installiert werden müssen, mit hohem Aufwand verbunden.

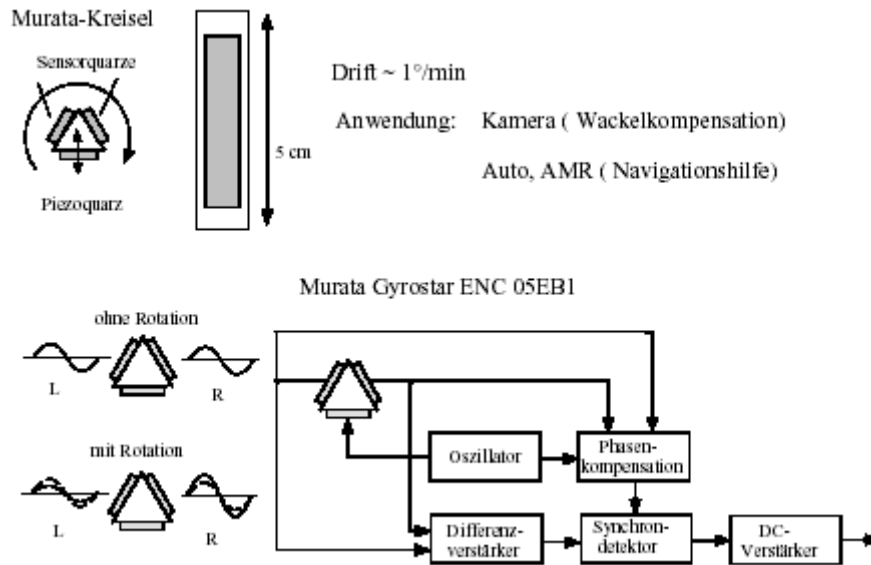


Abbildung 4.1: Funktionsschema des Murata-Kreisels (aus [5])

4.1.3 Richtungsbestimmung mit Drehratensensor

Mit einem Drehratensensor¹ lässt sich die Orientierungsänderung des Fahrzeugs direkt messen. Für den Einsatz im Fahrzeug wird keine große rotierende Masse wie beim Kreiselkompass benötigt, da ein mikromechanisches Gyrometer verwendet wird.

Für mikromechanisches Gyrometer gibt verschiedene Funktionsprinzipien, in Abbildung 4.1 das des Murata-Kreisels: Es wird ein durch Piezokristalle zum schwingen gebrachter Stab verwendet. Der Stab hat eine dreieckige Grundfläche. An einer Seite ist der Erregerkristall befestigt, an den beiden anderen Dreiecksseiten befinden sich Sensorquarze, mit denen die Drehung des Stabes um seine Längsachse gemessen wird. [5]

4.1.4 Strecke und Richtung

Die Auswertung der Radimpulse von zwei nicht angetriebenen Rädern ermöglicht die Bestimmung von Weg und Richtung. Es wird die Wegstrecke für Räder auf verschiedenen Seiten des Fahrzeugs bestimmt. Aus dem Wegunterschied kann die Richtung berechnet werden, da sich das Rad auf Seite der Kurve weniger weit dreht als das andere.

Im PKW werden dazu die Sensoren des Anti-Blockier-Systems (ABS) verwendet. Bei Nachrüstung im Bus stehen diese Signale nicht mit vertretbarem Aufwand zur Verfügung. Dieses Verfahren wird in PKW-Navigationssystemen eingesetzt. Die Genauigkeit unterliegt den gleichen Störungen wie die Messung des Wegimpulses.[6]

4.1.5 Beschleunigungssensor

Die Fahrzeuggeschwindigkeit kann anhand der Beschleunigung bestimmt werden. Zusammen mit einer Zeitmessung kann die Wegstrecke berechnet werden. Der Sensor muss dazu nur irgendwo im Fahrzeug platziert werden, die Messung funktioniert ohne Anschluss an einen

¹auch Gyroskop oder Gyrometer, oft kurz Gyro genannt.

Wegimpulsgeber. Über den Beschleunigungssensor kann auch die Fahrtrichtung bestimmt werden. Diese Methode ist zur Wegstreckenbestimmung ungenauer als die Wegimpulsmessung, dafür lässt sich ein Beschleunigungssensor einfach im Fahrzeug nachrüsten.

4.1.6 Bewertung der Sensorverfahren

Sowohl der Beschleunigungssensor, als auch das Gyroskop können mit geringem Aufwand nachträglich noch in Fahrzeuge eingebaut werden. Die Sensoren können an beliebiger Stelle platziert werden, so dass wenig zusätzliche Verkabelung nötig ist.

Sensoren für den Lenkradeinschlag und Radumdrehung können nur direkt an den Achsen montiert werden, so dass hier längere Kabelstrecken und ein Einbau der Sensoren an schwer zugänglichen Stellen erforderlich ist. Das Wegimpulssignal ist üblicherweise leicht zugänglich, die nötigen Sensoren sind bereits vorhanden. Die Signale der ABS-Sensoren dagegen sind nicht ohne weiteres auslesbar.

Für die Bestimmung der Fahrzeugrichtung ist das Gyroskop am Besten geeignet, für die Wegstreckenmessung wird der sowieso vorhandene Wegimpuls verwendet.

4.2 Satellitengestützte Positionsbestimmung

Zur Positionsbestimmung mit Hilfe von Satelliten gibt es verschiedene Systeme. Im Fahrzeug wird ein Empfänger benötigt, der Satellitensignale von außen empfängt.

4.2.1 Global Positioning System (GPS)

Funktion

Das Global Positioning System besteht aus einem Netzwerk Satelliten, die sich in einer Umlaufbahn um die Erde befinden. Sie sind so angeordnet, dass von jedem Punkt der Erde aus immer mindestens 6 Satelliten zu empfangen sind. Der Empfang ist allerdings nur möglich, wenn das Signal nicht durch Gebäude oder Berge behindert wird.

Jeder Satellit sendet neben seiner Position und der Uhrzeit auch eine dem Empfänger bekannte Pseudozufallsfolge, aus der über Phasenverschiebung die Laufzeit des Signals ermittelt werden kann.

Mit einem Satellit könnte man eine Kugelhülle um den Satellit bestimmen, auf der sich der Empfänger befinden muss. Schneidet man die Kugelhüllen um zwei Satelliten, so erhält man einen Kreis. Mit drei Satelliten verbleiben zwei Punkte, nur einer davon befindet sich in Erdnähe. Das ist der Standort des Empfängers.

Je mehr Satelliten im Empfangsbereich sind, desto genauer kann die Position berechnet werden. Zur Berechnung einer Position müssen mindestens Signale von drei verschiedenen Satelliten empfangen werden. Damit kann eine Position auf der Erdoberfläche bestimmt werden, die bestimmte Position wird als „2d Fix“ bezeichnet. Erst mit vier Satelliten ist auch eine Höhenbestimmung möglich, eine solche Position heißt „3d Fix“. Beim „2d Fix“ wird zur Berechnung eine Höhe angenommen, z.B. die zuletzt berechnete Höhe. [7] [8]

Das funktioniert aber nur, wenn die Uhr im GPS-Empfänger und alle Senderuhren synchron laufen. Jeder Satellit sendet Zeit- und Positionsdaten. Bei Empfang von mehreren Satelliten kann man einen Laufzeitunterschied bestimmen. Um die genaue Satellitenzeit zu bestimmen

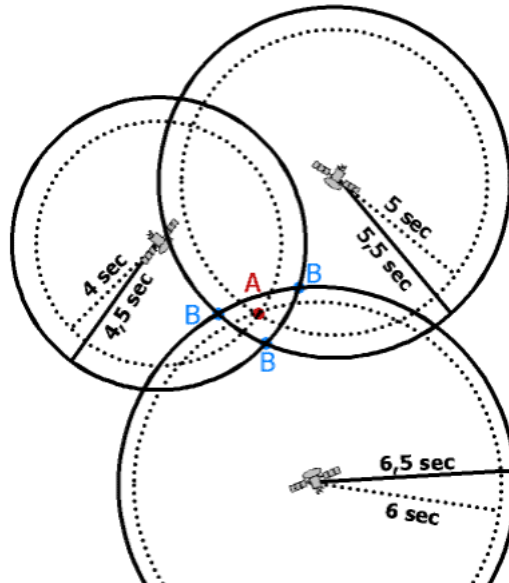


Abbildung 4.2: 2D Positionsbestimmung mit 3 Satelliten und Korrektur des Uhrenfehlers (aus[18])

ist ein vierter Satellit nötig. Der Empfänger korrigiert seine Zeit so lange, bis sich alle Kugeln in einem Punkt schneiden. [9] [10]

In Abbildung 4.2 wird die Korrektur des Uhrfehlers anhand eines zweidimensionalen Modells erklärt. Solange die Uhr des Empfängers nicht genau synchron zu den Satellitenuhren läuft ergibt sich kein eindeutiger Schnittpunkt der Entfernungskreise, sondern die drei mit B gekennzeichneten Schnittpunkte. Der Empfänger bestimmt einen Korrekturfaktor für die Laufzeit der Satellitensignale so, dass sie sich alle im Punkt A schneiden.

GPS-Koordinaten

Die Längen- und Breitengrade werden auf Basis eines Geoidmodells der Erde verwendet. Das sogenannte Kartendatum bestimmt den verwendeten Geoid, eine geometrische Annäherung an die Form der Erde. Der Standardgeoid, der weltweit eingesetzt werden kann, ist WGS84. Wichtig ist, dass die verwendete Landkarte und die vom GPS-Empfänger gelieferten Koordinaten das gleiche Kartendatum haben. [12]

Die vom GPS-Empfänger gemessene Position wird in Längen- und Breitengraden angegeben. Ein Abstand von einer Breitenminute beträgt immer 1852m (1 Seemeile). Der Abstand zwischen zwei Längen ist 1852m multipliziert mit dem Cosinus der Breite. Östliche Längen haben ein positives Vorzeichen, genau wie nördliche Breiten.

Die WGS84-Koordinaten können in einen Rechtswert und einen Hochwert umgerechnet werden wie Abbildung 4.3 zeigt.

Es gilt für einen Punkt P mit der Länge α und der Breite β :

$$(4.1) \quad \text{Rechtswert } x = 1852\text{m} * \alpha * \cos \beta$$

$$(4.2) \quad \text{Hochwert } y = 1852\text{m} * \beta$$

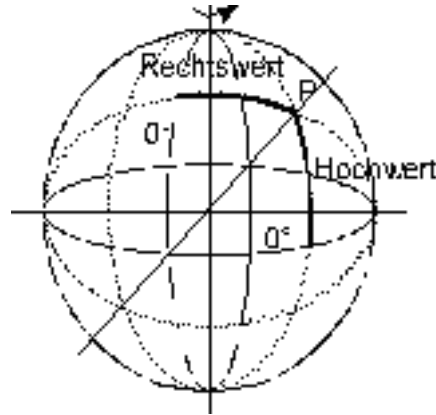


Abbildung 4.3: Sphärische Koordinaten (aus [3])

Dadurch erhält man ein Koordinatensystem, das im Nahbereich als kartesisch betrachtet werden kann. In diesem System sind Abstands- und Winkelberechnungen deutlich einfacher möglich als mit sphärischen Koordinaten. Wie bei den sphärischen Koordinaten hat auch der Rechtswert in östliche Richtung ein positives Vorzeichen, der Hochwert in nördliche Richtung ebenso.

Fehlerbetrachtung GPS

Seit im Mai 2000 die „Selective Availability“ (SA) abgeschaltet wurde liegt ein gemessener GPS-Punkt normalerweise maximal 10m von der echten Position entfernt. Die SA war eine künstliche Störung des Signals. Spezielle Empfänger für den Militäreinsatz werden davon nicht beeinträchtigt. Die Genauigkeit von zivilen Empfängern dagegen kann beliebig reduziert werden. [15] [16] Laut Auskunft des Interagency GPS Executive Board [14] ist nicht geplant, das Störsignal wieder zu aktivieren.

10m Genauigkeit bedeutet, dass 95% aller Positionsangaben in einen Kreis mit Radius 10m um die echte Position liegen, 50% sogar im 5m Kreis. [13]

Die GPS-Genauigkeit hat sich durch die SA Abschaltung für zivile Nutzer von ca. 100m auf etwa 10m erhöht. Heinrich Pfeifer ermittelt bei Messungen der Genauigkeit ohne SA: 50% der Messpunkte sind maximal 3,5m vom echten Standort entfernt, 95% aller Messpunkte sind maximal 8m vom echten Standort entfernt und im Umkreis von 11m um den Standort liegen 99% aller Messpunkte. [17]

Die nächste Generation der Satelliten (Block IIF) soll voraussichtlich über eine zweite Frequenz für die zivile Nutzung verfügen, die dann Positionsbestimmungen mit noch größerer Genauigkeit ermöglicht. Diese Satelliten werden nach der bisherigen Planung aber erst nach 2005 einsatzbereit sein. [18]

4.2.2 Differential GPS (DGPS)

Ein Empfänger für DGPS besteht aus einem normalen GPS-Empfänger und einem zusätzlichen Eingang für ein Differenzsignal. Das Differenzsignal wird meist per Funk ausgestrahlt. Um das Differenzsignal zu erzeugen wird an festen Orten, deren echte Position bekannt ist ein GPS-Signal empfangen und die Abweichung bestimmt. Aus dieser Abweichung ergeben sich die Korrekturdaten, die auch für mobile GPS-Empfänger in der Nähe gültig sind. Da DGPS auf

GPS aufbaut, wird trotz der höheren Genauigkeit leider keine höhere Zuverlässigkeit erzielt, da ohne GPS-Empfang auch DGPS nicht funktioniert. Die Genauigkeit hochwertiger DGPS-Empfänger liegt bei etwa 2m. [11]

4.2.3 Global Navigation Satellite System (GLONASS)

Das russische GLONASS-System arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie GPS. Es ist eine ähnliche Genauigkeit erreichbar, allerdings wird das Signal für den Zivilgebrauch gestört, so dass nur eine Genauigkeit von 100m möglich ist. [22]

GLONASS-Empfänger benötigen mehr komplexe Bauteile als GPS-Empfänger. Dadurch, und durch die geringere Verbreitung erklärt sich der höhere Preis. [19]

Betrieben wird das System vom russischen Verteidigungsministerium [21], genau wie GPS wurde es zur Zeit des Kalten Krieges entwickelt. Solange die SA noch aktiviert war, gab es Versuche, GLONASS zusammen mit GPS einzusetzen, um eine genauere Positionsbestimmung zu erreichen. [20]

4.2.4 Galileo

Das europäische Galileo System ist ebenfalls als satellitengestütztes Positionierungssystem geplant. Betreiber wird die European Space Agency (ESA) sein. Die Positionsbestimmung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei GPS und GLONASS. Zusätzlich soll noch ein Korrektursignal übertragen werden, mit dem Störungen durch die Atmosphäre verringert werden. Dazu werden Bodenstationen eingesetzt über deren bekannte Position die erforderliche Korrektur bestimmt wird. Diese Korrektur funktioniert ähnlich wie bei DGPS. Es wird mit einer Genauigkeit zwischen 1m und 10m gerechnet. [23] Als Fertigstellungstermin wird von der ESA im Moment das Jahr 2008 genannt. [24]

Der „European Geostationary Navigation Overlay Service“ (EGNOS), die erste Stufe des Galileo-Projekts [25] ist bereits im Testbetrieb. Es soll ab 2004 ein DGPS-Signal für Europa ausstrahlen. Im Testbetrieb wird noch kein nutzbares Signal gesendet. [26] Erst gegen Mitte 2004 soll das System komplett in Betrieb sein. Das EGNOS-Signal wird nur in Europa zu empfangen sein. Nach der Fertigstellung von Galileo soll die Genauigkeit die von GPS übertreffen.

4.2.5 Das NMEA-Datenformat

Die National Marine Electronics Association definiert das NMEA-Datenformat, mit dem Navigationssysteme unterschiedlicher Hersteller zusammenarbeiten können. Es sind Telegramme für die verschiedenen Navigationsanwendungen festgelegt. Diese ASCII-Telegramme werden normalerweise seriell übertragen. Sowohl GPS- als auch GLONASS-Empfänger sind mit Datenausgabe im NMEA-Format erhältlich. Es ist anzunehmen, dass auch Galileoempfänger dieses Format liefern werden. Leider ist das NMEA-Format ein recht weicher Standard. So bleibt es dem Hersteller überlassen, mit wievielen Nachkommastellen die Position übertragen wird. Auch gibt es manche Datentelegramme mit unterschiedlichen Längen. Der Copilot-Bordrechner ist in der Lage, über eine serielle Schnittstelle NMEA-Daten einzulesen. Somit kann das System leicht an einen anderen GPS-Empfänger angepasst werden.

4.2.6 Bewertung satellitengestützter Verfahren

Das Galileo-System verspricht größere Genauigkeit, die aber eventuell durch regelmäßige Nutzungsgebühr erkaufte werden muss. Das System ist noch nicht verfügbar, aber sobald es in Betrieb geht, ist es sicher eine Möglichkeit, die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu erhöhen. GLONASS-Empfänger sind teurer als GPS-Empfänger, zudem ist die Genauigkeit in der zivilen Version geringer. Das im Moment geeignetste System ist das auch bisher schon verwendete GPS.

4.3 Mobiltelefone

Es gibt bereits Fahrzeugsysteme, in denen Mobiltelefone zur Datenübertragung eingesetzt werden. Wenn das bereits vorhandene Telefon zusätzlich zur Positionsbestimmung eingesetzt werden könnte wäre das von Vorteil.

4.3.1 Bestimmung der Funkzelle

Von einem eingeschalteten Handy ist dem Provider bekannt, in welcher Funkzelle es eingebucht ist. Die Genauigkeit der Ortung ist von der Größe der Funkzelle abhängig. Dadurch ist eine Ortung in Städten auf 100 bis 500 Meter genau möglich. Außerhalb von Ballungsgebieten nimmt die Genauigkeit ab. Außerorts kann die Genauigkeit auf bis zu 10km fallen. [28]

4.3.2 Enhanced Observed Time Difference (EOTD)

Mit dem EOTD Verfahren soll es möglich werden, die Position überall im Netz auf 30m genau zu bestimmen. Hierzu misst das Handy die Laufzeitunterschiede von Signalen zu mehreren Sendern.[27] Das Handy selbst kann seine Position nicht bestimmen, da auf dem Gerät die Information über die Lage der Funkzellen fehlt. Wenn die Positionsangabe auf dem Handy benötigt wird, muss sie von einem externen Lokalisierungsdienst übertragen werden. Für EOTD wird die Signallaufzeit zu bis zu vier Sendern bestimmt. Da Außerorts oft nur ein oder zwei Sender in Reichweite sind nimmt die Genauigkeit dort ab. Für dieses Verfahren werden speziell dafür ausgestattete Geräte benötigt.[29]

4.3.3 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

Im Mobilfunknetz der 3. Generation, dem UMTS-Netz ist eine Ortung des Geräts auf 15m genau möglich. Hierzu wird die Signallaufzeit zu mindestens drei Antennen verwendet. Das UMTS-Netz soll von Anfang an für die Positionsbestimmung ausgerüstet sein. Zunächst erfolgt eine grobe Ortung auf Zellenbasis, dann eine feinpositionierung über Laufzeitunterschiede wie bei EOTD.

Ob allerdings überall drei Antennen zu empfangen sein werden, wird sich erst nach dem Ausbau des Netzes zeigen. Die erreichbare Genauigkeit wird von den Herstellern als deutlich geringer als bei GPS eingeschätzt. Das erklärt Entwicklungen wie das Assisted Global Positioning System (AGPS). Zunächst wird über die Funkzelle die ungefähre Position des Telefons bestimmt, dann übermittelt der Provider die Daten der für diese Position am besten geeigneten GPS-Satelliten. Der im Telefon eingebaute GPS-Empfänger kann mit Hilfe dieser Daten seine Position per GPS schneller bestimmen, als wenn er erst noch die richtigen Satelliten selbst suchen müsste. [30]

4.3.4 Bewertung Handyortung

Inzwischen gibt es Mobiltelefone, die EOTD unterstützen. Allerdings ist die Netzinfrastruktur noch nicht flächendeckend vorhanden.

Die Ortungsinformation ist leider nicht direkt vom Gerät ablesbar, sondern erst nach einer Nachfrage beim Provider, da nicht alle notwendigen Informationen auf dem Handy vorhanden sind.

In den USA wird eine Ortung von Mobiltelefonen bei Notruf auf 125m genau verlangt. Einige Netzbetreiber wollen diese Anforderung durch EOTD erfüllen, andere setzen auf zusätzliche GPS-Empfänger in den Handys. [31] [32] Die Notfallortung ist bis heute (Jahr 2003) nicht flächendeckend realisiert.

Die GPS-Methode wird angeboten, um Bandbreite, und damit Kosten, zu sparen sowie um die Genauigkeit zu verbessern. [33] Für die GPS-Ortung bezahlt man einmal für den Empfänger, es entstehen keine weiteren Nutzungskosten. Für die Ortung des Mobiltelefons dagegen fallen für jede Positionsbestimmung erneut Gebühren an.

Die Ortung über Bestimmung der Funkzelle ist noch ungenauer als EOTD, die UMTS-Ortung funktioniert ähnlich wie EOTD wird aber aufgrund des dichteren Netzes vielleicht etwas genauer. Auch die UMTS-Ortung kann durch GPS noch verbessert werden.

Handyortung ist GPS deutlich unterlegen. Die schnelle Positionsbestimmung mit AGPS ist für die Anwendung in Fahrzeugen nicht interessant, da der GPS-Empfänger im Fahrzeug ständig in Betrieb ist und damit über aktuelle Satellitendaten verfügt.

4.4 Ortsbaken

Ortsbaken sind kleine Funk- oder Infrarotsender, die eine Information an vorbeifahrende Fahrzeuge mit passendem Empfänger weitergeben. Üblicherweise wird nur die Nummer der Bake übermittelt, während die Standortinformation auf den Fahrzeug hinterlegt ist. Baken werden heute häufig eingesetzt, um wichtige Positionen genau zu erkennen. Dazu werden sie an genau vermessenen Punkten platziert. Mit ihrer Hilfe ist eine sehr genaue Positionierung möglich, wie sie zur Beeinflussung von Lichtsignalanlagen (LSA) erforderlich ist.

Baken müssen am jeweiligen Einsatzort aufgestellt werden. Je nach Einsatzort ist hierzu eine Genehmigung erforderlich. Die dezentrale Wartung, sowie die Notwendigkeit, in jedes Fahrzeug einen speziellen Empfänger einzubauen, erhöhen die Kosten dieser Lösung.

4.5 Verfügbare Kombisysteme

Um die relative Position eines Fahrzeugs zu bestimmen, muss die zurückgelegte Wegstrecke und die Fahrtrichtung bekannt sein. Dies lässt sich über fahrzeuginterne Sensoren messen. Um eine absolute Standortinformation zu erhalten, ist eine Initialisierung des Systems durch eine Positions- und Richtungsvorgabe notwendig. Dies kann durch manuelle Positionierung geschehen, es ist aber auch eine automatische Positionierung über GPS oder Ortsbaken möglich.

Am Markt gibt es zwei fertige Systeme, die beide eine Kombination aus GPS, Wegimpuls und Gyrosensoren verwenden: das Antaris SBR-LS und das Navigates NGH-200. Beide Systeme liefern auch bei Störung des GPS-Empfangs Datentelegramme im NMEA-Format, die die aktuelle Position des Fahrzeugs angeben. Das Komplettsystem ermöglicht es, ohne Softwareänderung

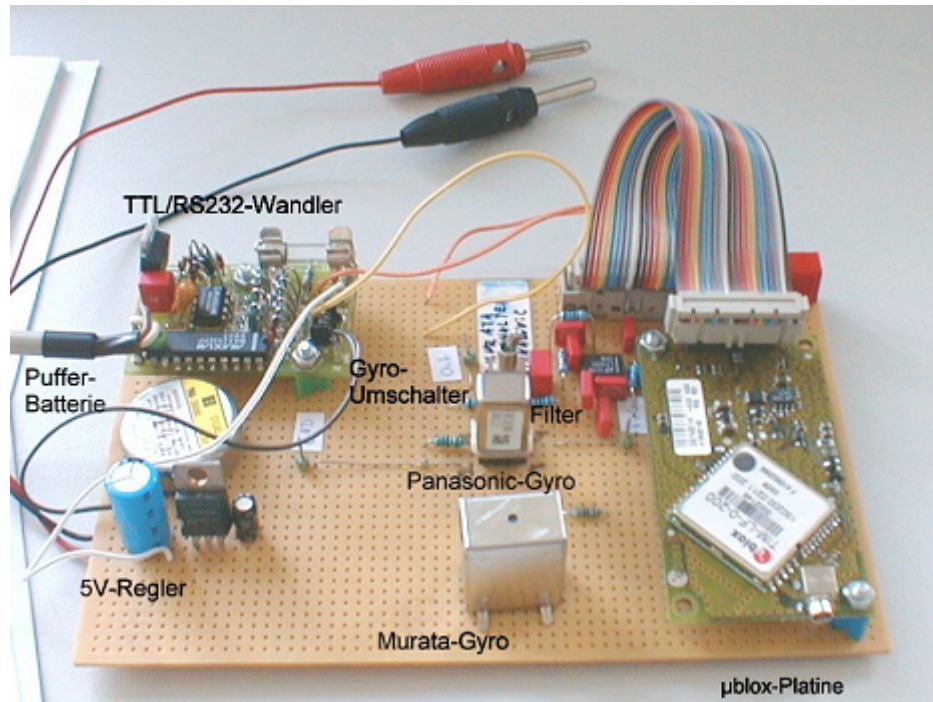


Abbildung 4.4: Testaufbau mit Antaris SBR-LS.

am Bordrechner Koppelnavigation zu verwenden. Der Bordrechner erhält GPS-Telegramme, die er mit bestehenden Programmroutinen auswertet.

4.5.1 Antaris SBR-LS

Die Schweizer Firma u-Blox stellt mit dem Antaris SBR-LS eine fertige Platine zur Verfügung, auf der sich ein GPS-Empfänger sowie ein Rechner zur Sensorauswertung befindet. Anzuschließen ist eine GPS-Antenne, Wegimpuls und ein Gyroskop. Ausgegeben wird eine GPS-Position im NMEA Format. Anhand der Datentelegramme ist es möglich zu erkennen, ob gerade ein echtes oder ein berechnetes Positionssignal geliefert wird. [4]

In Abbildung 4.4 ist die Antaris SBR-LS Platine rechts im Aufbau zu sehen. In der Mitte des Testboards sind zwei verschiedene Gyrosensoren montiert, die im Test keine unterschiedlichen Auswirkungen auf die Messergebnisse hatten.

Nachdem sich das System kalibriert hat, wird die vom Hersteller angegebene Genauigkeit erreicht. Maximal 5% Abweichung bei der Wegstrecke, und 3° je Minute bei der Richtung. Für den GPS-Empfänger wird eine Genauigkeit von 3m Circular Error Probable (CEP) angegeben. Die CEP gibt den Radius des Kreises an, in dem bei kreisförmiger Normalverteilung 50% der gemessenen Punkte liegen. Bei nur einer Messung liegt die gemessene Position also mit 50 prozentiger Wahrscheinlichkeit nicht in diesem Kreis.

In Abbildung 4.5 sieht man deutlich die Richtungsabweichung wenn kein GPS-Empfang besteht. Um GPS-Ausfall zu simulieren, wurde die Antenne vom Empfänger abgezogen. Abbildung 4.6 zeigt eine Fahrt auf der gleiche Strecke mit GPS-Empfang.

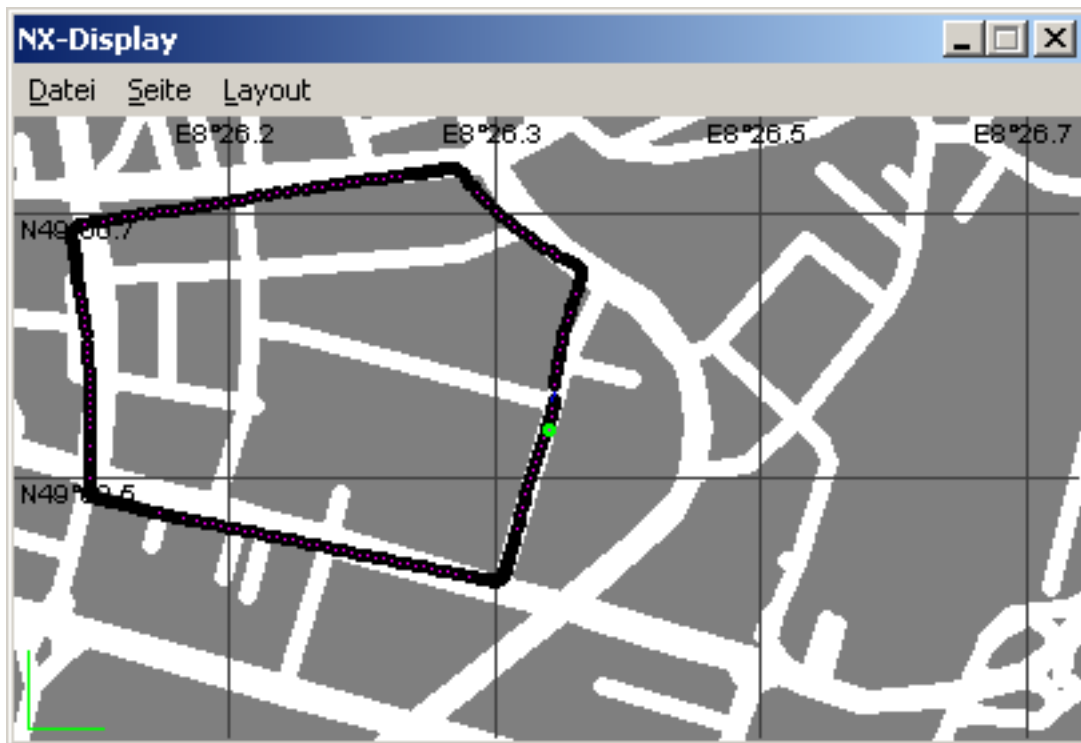


Abbildung 4.5: Testfahrt mit Antaris SBR-LS: Ohne GPS-Empfang kommt es zu Abweichungen bei der Richtungsbestimmung.

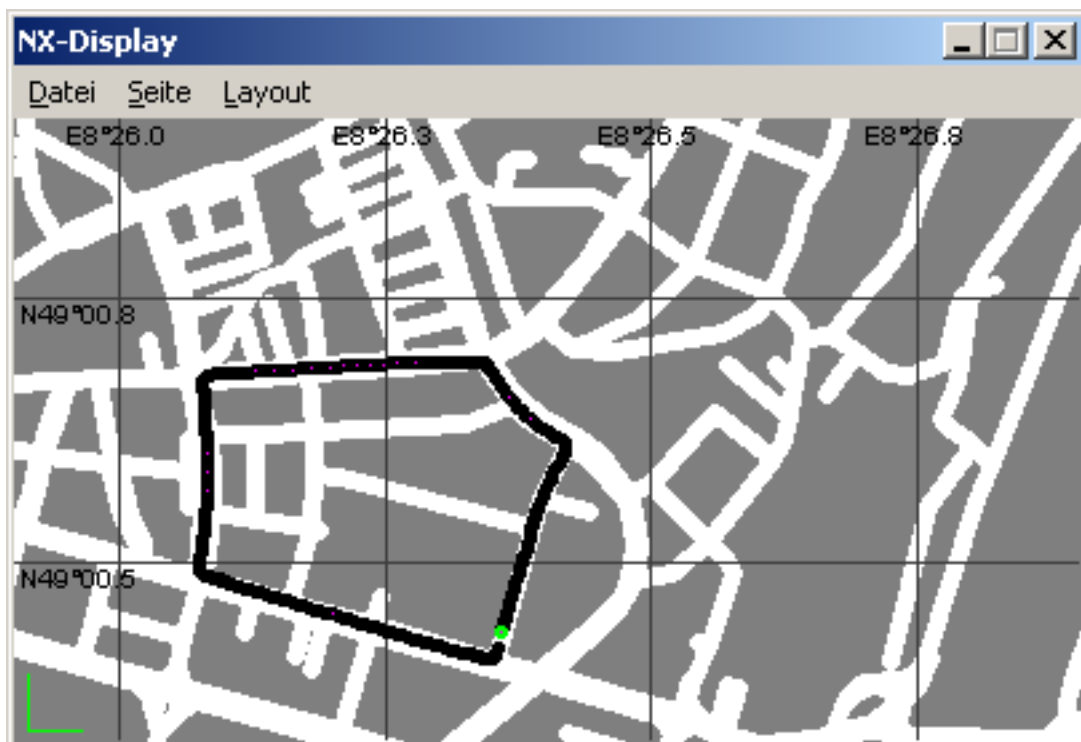


Abbildung 4.6: Testfahrt mit Antaris SBR-LS: Gleiche Strecke wie in Abbildung 4.5, aber mit GPS-Empfang.

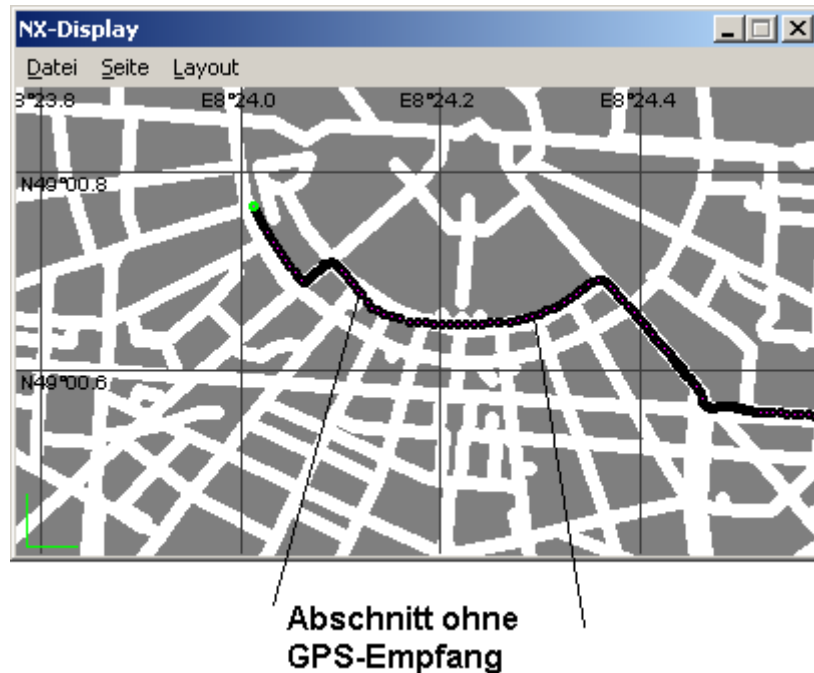


Abbildung 4.7: Testfahrt mit Navigates NGH-200: Auch im Tunnel unter dem Karlsruher Schlossplatz wird noch eine Position geliefert.

4.5.2 Navigates NGH-200

Das Navigates NGH-200 von Phytex hat einen Eingang für ein GPS-Positionssignal im NMEA-Format. Im Gerät sind zwei Gyrometer eingebaut. Mit einem werden Änderungen des Kurswinkels, mit dem anderen Änderungen des Nickwinkels gemessen. Zusätzlich verfügt das Navigates NGH-200 über einen Beschleunigungssensor, mit dem auch ohne Wegimpulssignal die zurückgelegte Strecke bestimmt werden kann, allerdings dann mit geringerer Genauigkeit. Es liefert am Ausgang ein NMEA-GPS-Signal. [34] In Abbildung 4.7 sieht man die Positionsstützung durch das Navigates NGH-200. Auch im Tunnel, in dem kein GPS-Empfang besteht werden noch GPS-Koordinaten geliefert. Leichte Abweichungen vom wirklichen Straßenverlauf sind zu erkennen.

4.5.3 Testfahrten mit den Kombisystemen

In den ersten Testfahrten waren die Messergebnisse der Kombisysteme nicht zufriedenstellend. Dies ließ sich aber im Nachhinein durch ungenügende Kalibrierung erklären. Beide Geräte kalibriert sich selbst. Dazu ist es notwendig, längere Zeit bei gutem GPS-Empfang unterwegs zu sein. Die Kalibrierung kann durch eine Kalibrierungsfahrt beschleunigt werden bei der vom Hersteller vorgegebene Manöver gefahren werden. Die Auswertung des Wegimpulses erfolgt bereits nach kurzer Zeit korrekt. Die Kalibrierung des Gyrosensors dagegen dauert länger. Abbildung 4.8 zeigt den wirklichen Verlauf der Testfahrt, die Abbildung 4.9 den mit noch nicht kalibriertem Gyrosensors gemessenen Verlauf. Wie man sieht werden in Kurven, die ohne GPS-Empfang gefahren werden, zu große Winkeländerungen festgestellt.

Der Stand der Kalibrierung des Antaris SBR-LS lässt sich mittels einer Systemsoftware abfragen. Solange das System nicht kalibriert ist kommt es auch bei ununterbrochen gutem GPS-Empfang zu Sprüngen in der Positionierung. Nach erfolgreicher Kalibrierung gibt es nur

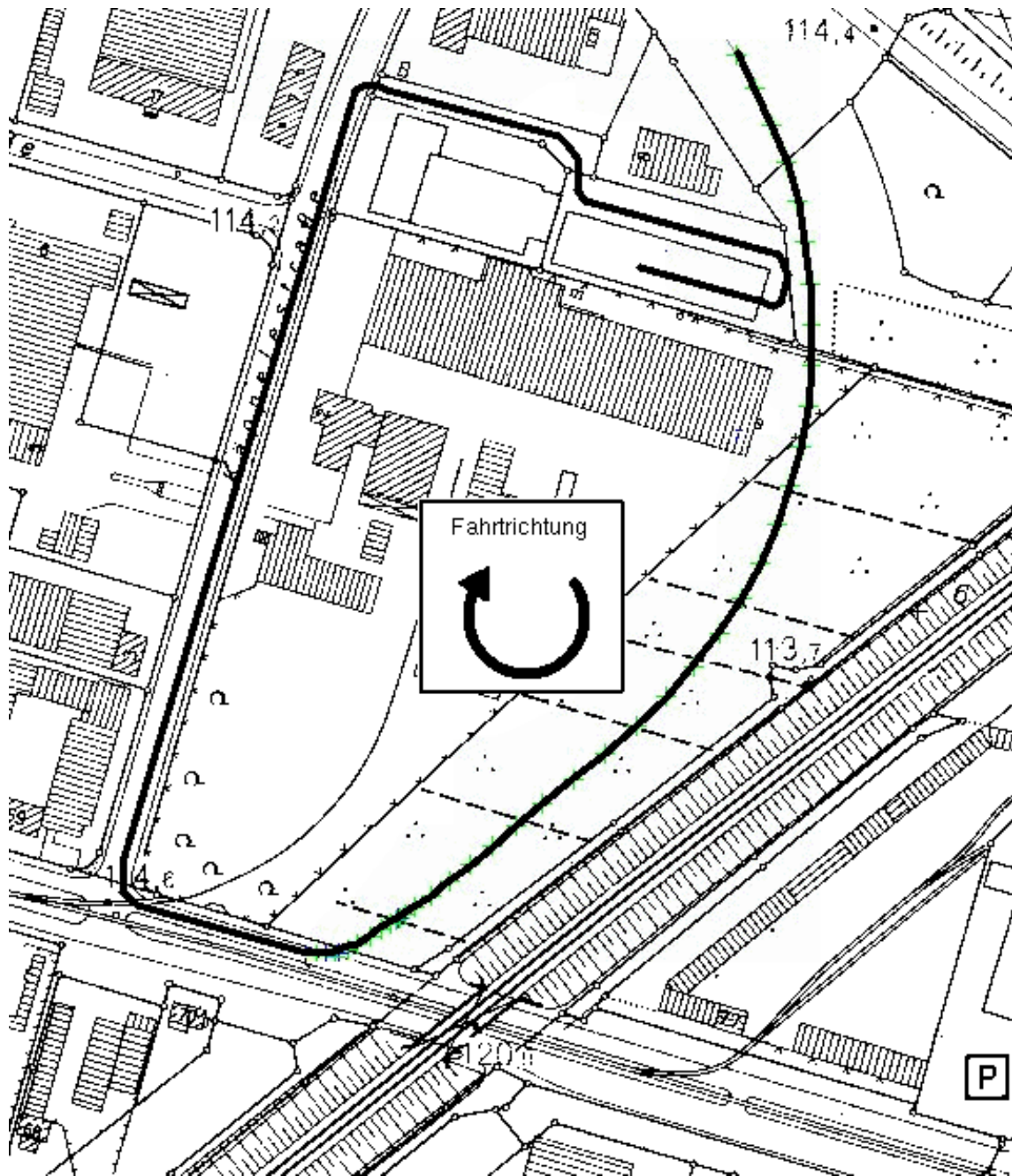


Abbildung 4.8: Weg der Testfahrt mit Antaris SBR-LS.

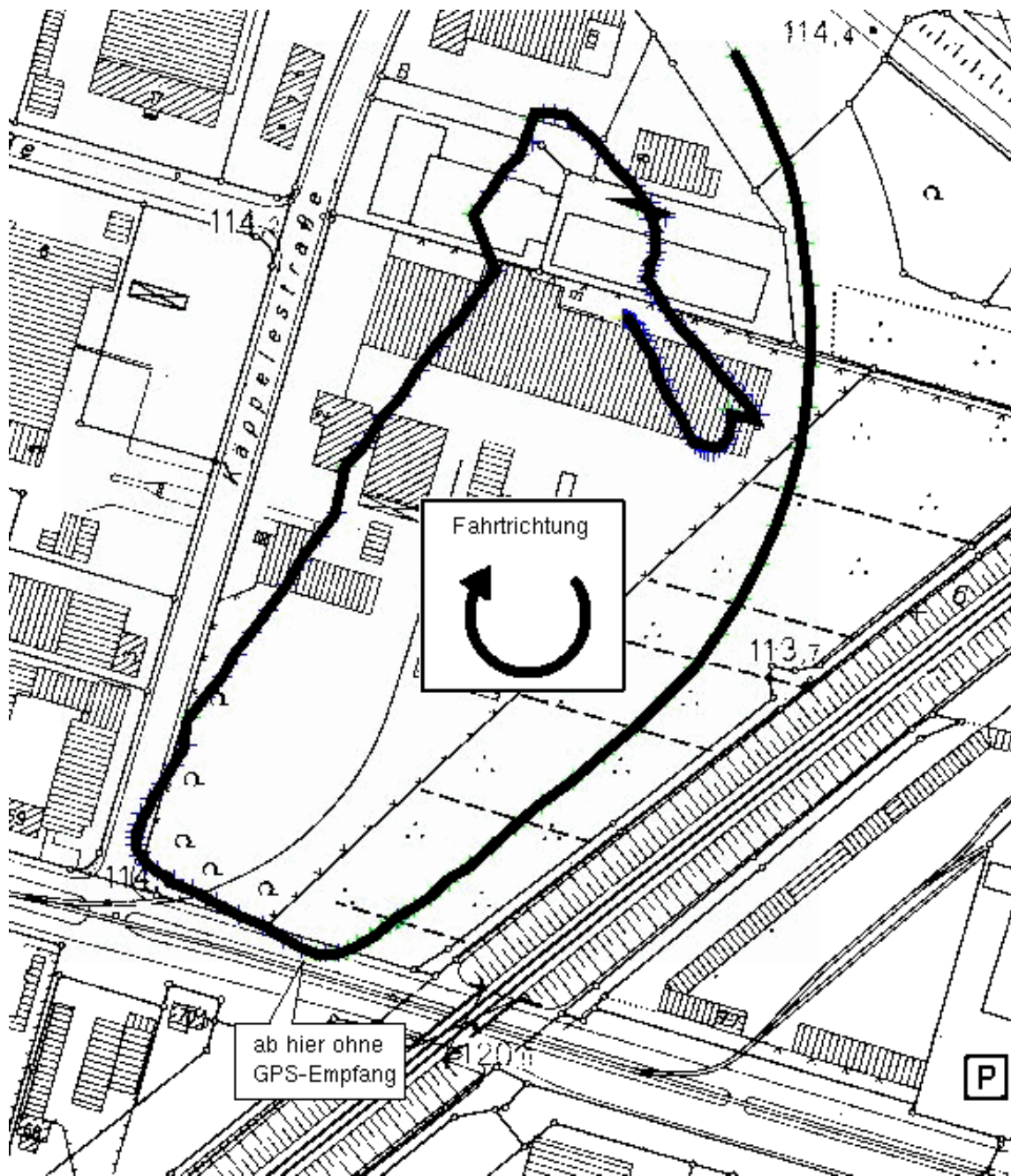


Abbildung 4.9: Messung der Strecke mit Antaris SBR-LS ohne ausreichende Kalibrierung des Gyrosensors.

noch Sprünge nach längerer Empfangsstörung wenn das Gerät feststellt, dass die aus Sensordaten errechnete Position überhaupt nicht mehr mit der vom GPS-Empfänger ermittelten übereinstimmt.

4.5.4 Bewertung der Kombisysteme

Das Navigates NGH-200 ist mit mehr Sensoren als das Antaris SBR-LS ausgestattet und es benötigt einen vollständigen GPS-Empfänger. Beim Antaris SBR-LS wird nur die Geschwindigkeit und die Änderung des Kurswinkels gemessen, auf seiner Platine ist der GPS-Empfänger mit integriert.

In den bisherigen Tests mit angeschlossenem Wegimpuls waren die Messwerte des Navigates NGH-200 nicht besser als die des preiswerteren Antaris SBR-LS. Der Hauptvorteil des Navigates NGH-200, die Unabhängigkeit von einem Wegimpulsanschluss, ist nicht relevant, da dieser für eine bessere Genauigkeit trotzdem verwendet wird.

Für den geplanten Einsatzzweck sind beide Systeme geeignet, so dass das preisgünstigere Antaris SBR-LS bevorzugt werden kann.

4.6 Stützung durch Kartendaten

4.6.1 Bekannte Streckenlänge

Bei Bahnen und Bussen, die auf bekannten Strecken unterwegs sind, genügt es wenn keine vollständige Straßenkarte, sondern nur die Abstände zwischen den Haltepunkten auf dem Bordrechner bekannt sind. Aus dem Abstand zwischen den Haltestellen kann die Lage auf der Linie bestimmt werden. Die Synchronisation der Positionierung erfolgt über das Erkennen von Haltestellen und Baken. Haltestellen werden über die Türfreigabe erkannt: wird die Tür des Busses geöffnet und befindet sich das Fahrzeug im Bereich einer Haltestelle, so wird die Fahrzeugposition auf die Haltestelle gesetzt. Dieses Verfahren funktioniert nur, solange die vorgegebene Route nicht verlassen wird.

4.6.2 Vektorkarten

Gemessene Positionen können mittels Kartendaten verbessert werden. Dazu wird die Straßeninformation in maschinenlesbarer Form als Vektorkarte benötigt. Durch logische Verfahren wird aus der GPS-Position eine korrigierte Position bestimmt. Zu diesem Zweck muss die Karte auf dem Rechner abgebildet werden. Eine Stützung mit Kartendaten ist bei Schienenfahrzeugen genauso möglich, wenn statt einer Straßenkarte eine Karte des Schienennetzes verwendet wird.

Vektorkarten der USA sind frei im Internet erhältlich. Die vom US Census Bureau unter der Bezeichnung TIGER/Line erfassten Daten liegen unter anderem im Shape-Format vor. [35] Das Shape-Format ist ein gängiges Vektorformat für Kartendaten. [36] Bei den TIGER/Line-Daten ist genau festgelegt, wie Straßen abgebildet werden. [37] Straßen werden aus Geraden zusammengesetzt. Sie haben einen Start- und einen Endpunkt, dazwischen beliebig viele Stützpunkte. Nur an Start- und Endpunkten können sich mehrere Straßen treffen.

Die von Karlsruhe vorliegenden Daten sind zwar ebenfalls im Shape-Format, entsprechen aber nicht den TIGER/Line Richtlinien. Hier können zwischen zwei Kreuzungen auch mehrere Straßenabschnitte liegen, anstatt eines durchgehenden Polylinienzugs.

4.6.3 Kartendaten auf dem Fahrzeug

Bei vielen Projekten wird in der Leitstelle zur Visualisierung der Fahrzeugpositionen eine Landkartendarstellung verwendet. Die gleichen Straßendaten sollen dann auch auf dem Bordrechner verwendet werden, damit die auf die Straße verbesserten Positionen auch in der Leitstelle auf der gleichen Straße angezeigt werden. Die Positionskorrektur für alle Fahrzeuge erst in der Zentrale durchzuführen bräuchte zu viel Rechenleistung. Zudem müssten mehr Daten vom Fahrzeug übertragen werden. Auch an Bord ist die genaue Position oft wichtig, beispielsweise zur Ansteuerung von Zielanzeigern oder zur Steuerung von Verkehrsampeln.

Deshalb erfolgt die Korrektur der Position bereits auf dem Fahrzeug. An die Leitstelle wird wie bisher auch eine GPS-Position übertragen, nur stimmt diese Position jetzt besser mit der tatsächlichen Position des Fahrzeugs überein.

In den USA basieren fast alle Vektorkarten auf den kostenlos erhältlichen TIGER/Line Daten. Eine Aufbereitung der Straßendaten zur Erleichterung der Straßensuche ist erforderlich. Das Datenformat für den Bordrechner soll es ermöglichen, mit möglichst wenig Speicherplatz und Rechenzeit auszukommen.

4.6.4 Bewertung Kartendaten

Mit einer Vektorkarte stehen deutlich mehr Informationen zu Verfügung, als wenn nur die Streckenlängen der Linien bekannt sind. Diese Informationen sind erforderlich, wenn es möglich sein soll, auch außerhalb von vorher festgelegten Linien unterwegs zu sein.

4.7 Gesamtsystem

Anhand der vorliegenden Informationen ist für die Anwendung in Verbindung mit dem Bordrechner das Antaris SBR-LS als GPS-Empfänger mit Gyroskop und Wegimpuls am geeignetsten. Beim Einbau entsteht kein großer Zusatzaufwand und die bestimmte Position wird deutlich verbessert. Dadurch, dass das Antaris SBR-LS auch ohne GPS-Empfang NMEA-Daten liefert ist keine zusätzliche Software zur Sensorauswertung erforderlich.

Zusätzlich erfolgt eine Stützung der gemessenen Positionen durch eine Vektorkarte. Die Implementierung der Positionsverbesserung mit Hilfe der Kartendaten wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Kapitel 5

Implementierung

Im praktischen Teil erfolgte die Implementation der Kartenstützung für den Copilot Bordrechner. Hierzu wurde die Nixe Bibliothek als Standardumgebung für den Copilot PC verwendet. Bei der Nixe Bibliothek handelt es sich um eine Eigenentwicklung der INIT, die speziell für die Anforderungen des Bordrechners entworfen wurde. Die Programmierung erfolgte in C++. Anstatt compilerabhängige Bibliotheken, wie z.B. die Microsoft Foundation Classes zu verwenden, wurden die entsprechenden Nixe Funktionen benutzt. Dadurch ist ein Programm ohne Änderungen im Quelltext unter VX-Works und auf PCs übersetzbar.

Das Nixesystem ist modular aufgebaut. Je nach Projekt und Anforderungen kommen unterschiedliche Module zum Einsatz. Über eine Konfigurationsdatei können die benötigten Module ausgewählt werden, ohne das System neu zu übersetzen. Auch die Kartenstützung wurde als Modul realisiert.

Die Tests wurden anhand von Simulationen durchgeführt. Mittels eines GPS-Simulationsprogramms können aufgezeichnete Testfahrten abgespielt werden. So konnten verschiedene Verbesserungsmethoden an der gleichen Situation getestet werden. Das Simulationsprogramm ist nur in der Lage, GPS-Punkte zu simulieren, nicht die zugehörigen Wegimpulse.

Anstelle eines normalen GPS-Empfängers soll ein Antaris SBR-LS eingesetzt werden. Zu Beginn der Programmentwicklung standen jedoch nur Kartendaten von New York zur Verfügung. Aus New York gibt es nur eine aufgezeichnete Testfahrt, die mit einem normalen GPS-Empfänger ohne Gyroskopstützung erstellt wurde.

Erst als dann doch noch Kartendaten von Karlsruhe vorlagen, konnte das Programm mit Aufzeichnungen des Antaris SBR-LS getestet werden.

5.1 Vektorkarte

5.1.1 Aufbereitung der Kartendaten

Die verwendeten Kartendaten liegen als Shape-Dateien vor. Die Shape-Dateien mit den Straßendaten müssen so umgesetzt werden, dass sie auf dem Bordrechner gespeichert werden können. Alle Shape-Dateien, die für das Einsatzgebiet relevant sind, werden zu einer Datei, in der nur die Straßenzüge gespeichert werden, aufbereitet. Nach Möglichkeit werden zur Erzeugung der Straßendatei für den Bordrechner die gleichen Rohdaten verwendet, mit der auch die Leitstelle arbeitet, da in der Leitstelle die GPS-Punkte auf einer Landkarte angezeigt werden.

Kachelgröße (Bogenminuten)	100	2	1	0,7	0,5	0,1
Dateigröße (KByte)	1597	1650	1703	1750	1815	2950
Kartengröße (Kacheln)	1*1	17*13	34*26	48*36	67*51	334*251
durchschnittliche Straßenzahl je Kachel	91317	830	254	139	78	6

Tabelle 5.1: Auswirkung der Kachelgröße auf die Dateigröße: New York

Kachelgröße (Bogenminuten)	100	2	1	0,7	0,5	0,1
Dateigröße (KByte)	635	668	706	741	788	1710
Kartengröße (Kacheln)	1*1	22*13	44*25	62*63	87*50	434*246
durchschnittliche Straßenzahl je Kachel	25302	206	65	36	21	3

Tabelle 5.2: Auswirkung der Kachelgröße auf die Dateigröße: Karlsruhe

Die Eingangsdaten enthalten viel mehr Informationen als auf dem Bordrechner benötigt werden. Um eine schnelle Übertragung der Daten per WLAN zu ermöglichen, müssen die Daten auf die unbedingt notwendigen Informationen reduziert werden.

Um eine schnellere Suche in den Straßendaten zu ermöglichen, wird die Karte in Kacheln eingeteilt. Dadurch wird eine schnelle Vorauswahl von Straßen in einem gesuchten Bereich ermöglicht, es müssen nicht alle Straßen untersucht werden, sondern nur die, die auf in Frage kommenden Kacheln liegen. Die Erzeugung der Kacheln geschieht bereits bei der Offline-Datenaufbereitung. Nur die aufbereitete Karte muss an den Bordrechner übertragen werden.

Mittels eines von Frank Binder entwickelten Programms wird aus den Kartendaten im Shape-Format eine Datei erzeugt, die nur die für die Positionsverbesserung relevanten Daten enthält. Die Einteilung in Kacheln wird schon hier vorgenommen. Diese Kartendatei wird dann auf den Bordrechner übertragen.

Je nach gewählter Kachelgröße ergeben sich unterschiedlich große Kartendateien wie in Tabelle 5.1 für die Kartendaten von New York und in Tabelle 5.2 für Karlsruher Daten zu sehen ist.

Eine Kachel soll so klein sein, dass eine gute Vorauswahl der Straßen ermöglicht wird. Allerdings werden bei kleineren Kacheln eine zunehmende Anzahl von Straßen auf mehreren Kacheln abgelegt. Diese Straßen müssen dann mehrfach untersucht werden. Zudem wird die Kartendatei umso größer, je kleiner die Kacheln werden, da Straßenabschnitte in allen Kacheln gespeichert werden, in denen sie liegen. Die Kacheln müssen groß genug gewählt sein, damit nicht zu viele Straßen mehrfach untersucht werden.

Die Tabellen 5.3 und 5.4 zeigen die Auswirkung verschiedener Kachelgrößen auf die Anzahl der mehrfach abgelegten Straßen.

Je größer die Kacheln werden, umso kleiner wird die Kartendatei. Ohne Kacheln dauert die Straßensuche zu lange. Straßen, die auf mehreren Kacheln liegen, müssen bei der Straßensuche mehrmals betrachtet werden, oder es muss eine Liste der bereits geprüften Straßen mitgeführt werden. Eine Kachelgröße von einer Bogenminute ist ein guter Kompromiss zwischen diesen Anforderungen, im Beispiel New York liegen bei dieser Kachelgröße von 91317 Straßenzügen unter 10% in mehr als einer Kachel.

Die für New York vorliegenden Straßendaten sind 21MB groß, nach der Umwandlung verbleiben 1,6MB, nur 8% der ursprünglichen Größe. Viele der in den Shape-Dateien abgelegten Daten, wie der Straßennamen oder die Straßenart, gehen dabei natürlich verloren. Da diese Daten

Kachelgröße (Bogenminuten)	100	2	1	0,7	0,5	0,1
Straßen liegen in						
1 Kachel	91317	87206	83284	79988	75728	31991
2 Kacheln		4053	7806	10916	14703	40413
3 Kacheln		55	218	404	866	15777
4 Kacheln		3	8	7	14	2574
5 Kacheln			1	1	2	286
6 Kacheln				1	1	120
7 Kacheln					2	70
8 Kacheln					1	29
9 Kacheln						28
10 Kacheln						6
11-20 Kacheln						15
21-30 Kacheln						2
31-40 Kacheln						3

Tabelle 5.3: Auswirkung der Kachelgröße auf mehrfach abgelegte Straßen: New York

Kachelgröße (Bogenminuten)	100	2	1	0,7	0,5	0,1
Straßen liegen in						
1 Kachel	25302	23837	22451	21427	20176	9778
2 Kacheln		1404	2603	3369	4297	9087
3 Kacheln		59	223	430	634	3606
4 Kacheln		1	23	64	127	1090
5 Kacheln		1	0	10	48	514
6 Kacheln			2	1	13	341
7 Kacheln				0	3	215
8 Kacheln				1	2	161
9 Kacheln					1	108
10 Kacheln					1	94
11-20 Kacheln						260
21-30 Kacheln						54
31-50 Kacheln						4

Tabelle 5.4: Auswirkung der Kachelgröße auf mehrfach abgelegte Straßen: Karlsruhe

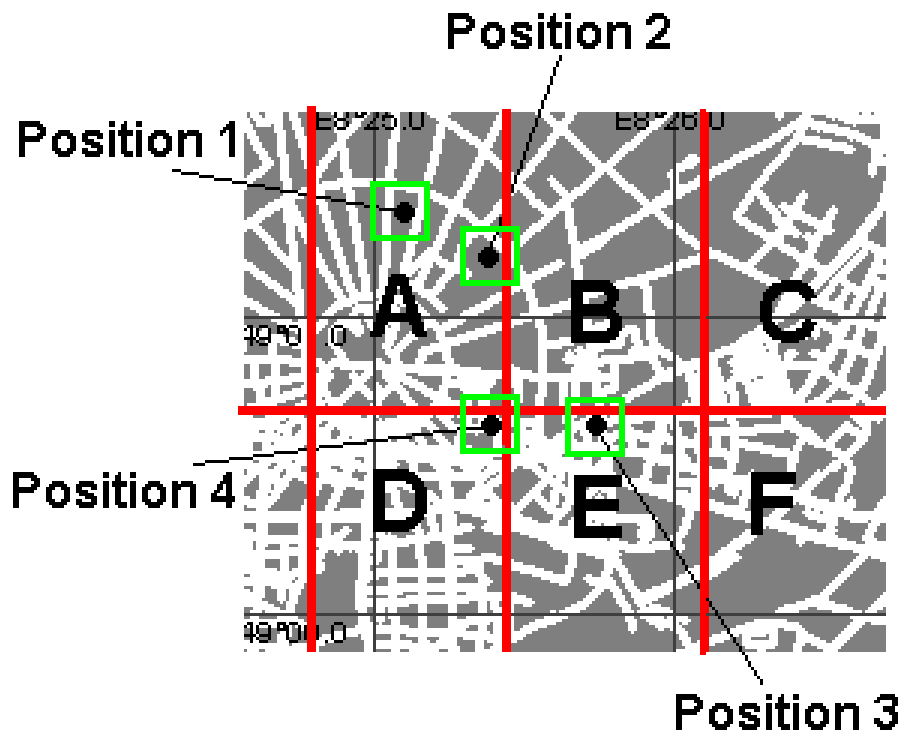


Abbildung 5.1: Auswahl der Kacheln abhängig von der Position.

nicht zur Positionsverbesserung benötigt werden, kann man sie problemlos weglassen. Es werden nur die Straßenstücke als Polylinienzüge, also Koordinatenpaare von Stützpunkten einer durchgezogenen Linie, sowie die Informationen über die Kacheleinteilung benötigt.

Die Rohdaten des Karlsruher Straßennetz sind 5,5MB groß. Die für den Bordrechner aufbereitete Karte ist noch 706K groß, das sind noch 13% der Ausgangsgröße.

5.1.2 Kachelauswahl zur Straßensuche

Aufgrund der Kachelstruktur der Kartendaten genügt es, nur einen Teil der Straßenzüge zu untersuchen. Im ersten Ansatz wurden zu einem Punkt alle Straßen betrachtet, die auf der gleichen Kachel wie dieser Punkt, oder auf einer der acht benachbarten Kacheln lagen.

So viele Kacheln sind aber garnicht erforderlich; um alle Straße in einer Entfernung d um den Punkt (p_x, p_y) zu finden genügt es, alle Kacheln zwischen $(p_x - d, p_y - d)$ und $(p_x + d, p_y + d)$ betrachtet. Falls d kleiner ist als die Kachelgröße sind das eine, zwei oder vier Kacheln. Eigentlich wäre es ausreichend, alle Kacheln im Umkreis d um P zu bestimmen, allerdings wird die Berechnung bei einem Umgebungsrechteck statt einem Umgebungskreis einfacher und es wird nur in wenigen Fällen eine Kachel mehr als mit Umgebungskreis ausgewählt.

Betrachtet werden muss eine Kachel für alle Punkte, die von allen Kachelrändern mindestens d entfernt sind. Position 1 in Abbildung 5.1 ist ein solcher Punkt, es wird nur Kachel A gewählt. Zwei Kacheln müssen für alle Punkte betrachtet werden, die von genau einem Kachelrand weniger als d entfernt sind, wie es an den Positionen 2 und 3 der Fall ist. Von Position 2 aus sind die Kacheln A und B zu betrachten. Auch in Position 3 werden zwei Kacheln benötigt: B

und E. Falls zwei Kachelränder vom Punkt aus weniger als d entfernt sind, müssen vier Kacheln untersucht werden, wie das an Position 4 der Fall ist. Im Beispiel sind das die Kacheln A, B, D und E. In der Abbildung sind die Suchrechtecke grün, die Kachelgrenzen rot eingezeichnet.

Es werden maximal vier Kacheln ausgewählt, das ist eine deutliche Verbesserung zu den im ersten Ansatz gewählten neun Kacheln.

Damit bei der Kachelauswahl im Programm keine Fallunterscheidung gemacht werden muss, und damit die Routine unabhängig von der Größe des Suchrechtecks und der Kachelgröße funktioniert, wird von der zu verbessernden Position aus berechnet, auf welcher Kachel die linke obere Ecke des Suchrechtecks liegt. Es werden alle Kacheln zwischen dieser Kachel und der Kachel, auf der die rechte untere Ecke des Suchrechtecks liegt, betrachtet. Da jede Kachel über zwei Koordinaten identifiziert wird, können alle zu prüfenden Kacheln durch zwei geschachtelte for-Schleifen durchlaufen werden. Dieses Verfahren funktioniert auch, falls d größer als die Kachelgröße sein sollte.

Eine weitere Vorauswahl der Straßenabschnitte innerhalb der Kachel würde zusätzliche Daten über die Begrenzung des Straßenzugs erfordern. Zu jedem Straßenzug das zugehörige Begrenzungsrechteck in den Daten abzulegen würde mehr Speicherplatz verbrauchen, dafür wäre weniger Rechenzeit zur Straßensuche erforderlich. Da das verwendete Verfahren zur Straßensuche auch ohne diese Verbesserung schnell genug ist, wird auf eine weitere Rechenzeitorientierung verzichtet um Speicherplatz zu sparen.

5.2 Module

Die folgenden Module für den Bordrechner sind für die Ortungsverbesserung mittels Kartenstützung wichtig.

5.2.1 Anzeige von Positions- und Kartendaten – NxGpsDrawMap

Die Karte kann auf dem Bildschirm des Bedienteils angezeigt werden. Diese Anzeige wurde im Rahmen der Diplomarbeit entwickelt um eine Kontrolle der Kartendaten zu ermöglichen, sowie die Auswirkung der Verbesserungsfunktionen zu überprüfen.

In Abbildung 5.2 ist die Anzeige zu sehen. Die Straßen werden als weiße Linien auf grauem Hintergrund angezeigt. Ein grüner Punkt kennzeichnet die zuletzt bestimmte Position, schwarze Punkte die vorherigen. Um schnell die Auswirkung der Verbesserungsfunktion erkennen zu können werden in einer speziellen Debug-Version die gemessenen Punkte zusätzlich als gelbe Linie angezeigt. Die verbesserten Punkte werden mit einer Geraden mit den zugehörigen gemessenen Positionen verbunden um eine schnelle optische Fehlerkontrolle zu ermöglichen. Über der Karte liegt ein Raster im Bogenmaß, in der linken unteren Ecke befindet sich ein Winkel mit einer Länge von 100m. Das Nix-System stellt zu Testzwecken eine Kommandozeile zur Verfügung, mit der Funktionen ausgelöst werden können, die im normalen Betrieb nicht erforderlich sind. Mittels Kommandozeilenbefehlen lassen sich weitere Eigenschaften der Kartenanzeige, wie die Vergrößerung, einstellen. Die Kachelgrenzen sowie Koordinatenangaben zur Anzeige werden nur im Debug-Modus angezeigt. Die Farben wurden so gewählt, dass sie auch auf der Flüssigkristallanzeige des Fahrerdisplays, dem Bedienteil des Bordrechners, zu erkennen sind. Die in den Abbildungen zu sehende Menüleiste und der Fensterrahmen werden nicht auf das Fahrerdisplay übertragen.

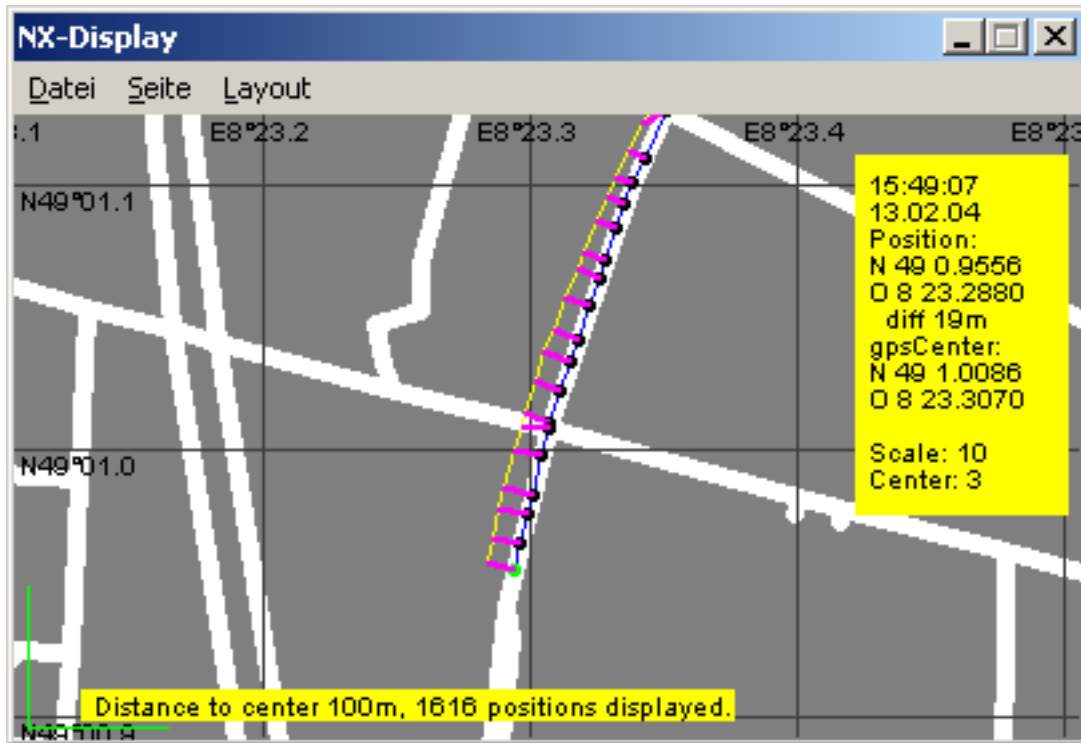


Abbildung 5.2: Kartenanzeige auf dem Fahrerdisplay im Debug-Modus.

5.2.2 Kommunikation mit der GPS-Hardware – NxGpsDevice

Im bestehenden Modul „NxGpsDevice“ ist die Schnittstelle zur GPS-Hardware definiert. Die Datenstruktur, in der empfangene GPS-Telegramme abgelegt werden wurde so angepasst, dass das neu entwickelte Modul „NxGpsMapImp“ berechtigt ist, empfangene GPS-Daten nachträglich zu verändern, was für die Positionskorrektur erforderlich ist.

5.2.3 Auswertung von GPS-Telegrammen – NxGpsDeviceNmeaTele

Das Modul „NxGpsDeviceNmeaTele“ ist für die Auswertung der GPS-Telegramme zuständig. Da zwar alle GPS-Empfänger Daten im NMEA-Format liefern, aber dieser Standard recht offen ist, waren einige kleine Anpassungen bei der GPS-Telegrammauswertung erforderlich. Das bestehende Modul „NxGpsDeviceNmeaTele“ wurde an die vom Antaris SBR-LS gesendeten Telegramme angepasst.

5.2.4 Verteilung von GPS-Telegrammen – NxGpsImp

Das Modul „NxGpsImp“ ist ein „NxGpsProvider“, das bedeutet, andere Module, die GPS-Daten benötigen, registrieren sich hier und erhalten dann automatisch alle empfangenen GPS-Telegramme. Dieses Modul wird bisher als „NxGpsProvider“ verwendet. Bei Verwendung der Kartenstützung wird es durch „NxGpsMapImp“ ersetzt.

5.2.5 Verteilung verbesserter GPS-Telegrammen – NxGpsMapImp

Das im Rahmen dieser Arbeit neue entwickelte Modul „NxGpsMapImp“ ist genau wie „NxGpsImp“ ein „NxGpsProvider“. Es kann anstelle von „NxGpsImp“ verwendet werden, und hat nach außen hin die gleichen Schnittstellen. Ein Austausch von „NxGpsImp“ gegen „NxGpsMapImp“ ist transparent möglich. Die Positionsangabe im empfangenen GPS-Telegramm wird mit Hilfe von Kartendaten verbessert, bevor das Telegramm an alle registrierten Empfänger weitergeleitet wird.

5.2.6 Kartendaten – NxMap

Über den „NxMap“-Dienst ist der Zugriff auf die Kartendaten möglich. Der Zugriff erfolgt auf Kachelebene. Es kann die Zahl der Straßen auf einer bestimmten Kachel abgefragt werden, ebenso kann auf jede Straße einer Kachel zugegriffen werden. „NxMap“ wurde zusammen mit der Umsetzung der Kartendaten von Frank Binder implementiert.

5.3 Abstand zur Straße

Gegeben ist ein Straßenstück als Strecke (AB). Die vom GPS-Empfänger gemessene Position sein P . Gesucht ist der Punkt G auf (AB) mit dem geringsten Abstand zu P . F ist der Schnittpunkt von AB mit der Senkrechten zu AB durch P . Falls F zwischen A und B liegt ist das der gesuchte Punkt G , ansonsten ist G als der Endpunkt der Strecke zu wählen, der näher an P liegt. Zu Beginn der Berechnung sind die Punkte, wie auf Seite 18 beschrieben, in ein kartesisches System zu übertragen.

Die Gerade f durch A und B lautet in Punkt-Richtungsform:

$$(5.1) \quad f : \vec{x} = \vec{A} + k(\vec{B} - \vec{A})$$

Zur Bestimmung der Gerade g durch P , $\perp AB$ wird ein Richtungsvektor \vec{v} senkrecht zur Richtung \vec{u} von AB benötigt.

$$(5.2) \quad \vec{u} = \vec{B} - \vec{A} = \begin{pmatrix} b_x - a_x \\ b_y - a_y \end{pmatrix}$$

Der Vektor $\vec{v} = \begin{pmatrix} -b_y + a_y \\ b_x - a_x \end{pmatrix}$ erfüllt diese Bedingung, da

$$(5.3) \quad \vec{u} \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} b_x - a_x \\ b_y - a_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -b_y + a_y \\ b_x - a_x \end{pmatrix}$$

$$(5.4) \quad = (b_x - a_x) * (-b_y + a_y) + (b_y - a_y) * (b_x - a_x)$$

$$(5.5) \quad = -b_x b_y + b_x a_y + a_x b_y - a_x a_y + b_x b_y - a_x b_y - b_x a_y + a_x a_y$$

$$(5.6) \quad = 0 \Rightarrow \vec{u} \perp \vec{v}$$

Damit lautet die Geradengleichung von g

$$(5.7) \quad g : \vec{x} = \vec{P} + n \begin{pmatrix} -b_y + a_y \\ b_x - a_x \end{pmatrix}$$

Im Fußpunkt $F : f \cap g$ gilt:

$$(5.8) \quad a_x + k(b_x - a_x) - p_x - n(-b_y + a_y) = 0$$

$$(5.9) \quad \text{und} \quad a_y + k(b_y - a_y) - p_y - n(b_x - a_x) = 0$$

aus 5.8 folgt für $a_y \neq b_y$:

$$(5.10) \quad n = \frac{a_x + k(b_x - a_x) - p_x}{-b_y + a_y}$$

in 5.9 eingesetzt:

$$(5.11) \quad a_y + k(b_y - a_y) - p_y - \frac{a_x + k(b_x - a_x) - p_x}{-b_y + a_y}(b_x - a_x) = 0$$

$$(5.12) \quad a_y - p_y + k(b_y - a_y) + \frac{(a_x - p_x)(b_x - a_x) + k(b_x - a_x)^2}{b_y - a_y} = 0$$

$$(5.13) \quad k(b_y - a_y) + \frac{k(b_x - a_x)^2}{b_y - a_y} = -(a_y - p_y) - \frac{(a_x - p_x)(b_x - a_x)}{b_y - a_y}$$

$$(5.14) \quad k \frac{(b_y - a_y)^2 + (b_x - a_x)^2}{b_y - a_y} = -(a_y - p_y) - \frac{(a_x - p_x)(b_x - a_x)}{b_y - a_y}$$

$$(5.15) \quad k((b_y - a_y)^2 + (b_x - a_x)^2) = -(b_y - a_y)(a_y - p_y) - (a_x - p_x)(b_x - a_x)$$

$$(5.16) \quad k = \frac{-(b_y - a_y)(a_y - p_y) - (a_x - p_x)(b_x - a_x)}{(b_y - a_y)^2 + (b_x - a_x)^2}$$

daraus ergibt sich

$$(5.17) \quad k = \frac{(a_y - p_y)(a_y - b_y) + (p_x - a_x)(b_x - a_x)}{(b_x - a_x)^2 + (b_y - a_y)^2}$$

$$(5.18) \quad \vec{F} = \begin{pmatrix} a_x + k(b_x - a_x) \\ a_y + k(b_y - a_y) \end{pmatrix}$$

Das k aus Gleichung 5.17 wird explizit berechnet, da es nicht nur in Gleichung 5.18 zur Berechnung des Fußpunktes F benötigt wird. Anhand von k kann geprüft werden, ob sich F auf (AB) befindet. Für $0 \leq k \leq 1$ liegt F auf (AB) . Für $k < 0$ liegt F außerhalb von (AB) , näher bei A und für $k > 1$ liegt F außerhalb von (AB) , näher bei B .

Wenn die Straße parallel zur y-Achse verläuft, das heißt genau in Ost-West bzw. West-Ost Richtung, dann ist $a_y = b_y$. In diesem Fall ist

$$(5.19) \quad \vec{F} = \begin{pmatrix} p_x \\ a_y \end{pmatrix}$$

Falls der Abstand \overline{AF} größer als der Abstand \overline{AB} ist, liegt F außerhalb von (AB) , näher bei B . Für $\overline{BF} > \overline{AB}$ liegt F entsprechend außerhalb, näher bei A . Ansonsten liegt F zwischen A und B .

Falls F nicht zwischen A und B liegt, wird der Endpunkt, der näher an F liegt als auf die Straße verbesserte Position G verwendet. Für F zwischen A und B ist $G = F$.

Ein Straßenzug kann aus mehreren Geraden bestehen. Zu jeder Geraden wird ein Punkt G_n bestimmt. Derjenige Punkt mit dem kleinsten Abstand $\overline{PG_n}$ ist die gesuchte Position auf der Straße mit dem kleinsten Abstand von P .

5.4 Berechnung des Kurswinkels

Sobald zwei GPS-Positionen bekannt sind kann die Fahrtrichtung bestimmt werden. Die Fahrtrichtung wird als Kurswinkel gespeichert. Der Kurswinkel ist der Winkel zwischen der gefahrenen Richtung und der Nordrichtung.

Ein Kurswinkel von 0° bedeutet also, das Fahrzeug fährt nach Norden. 90° Richtung Osten, 180° nach Süden und 270° nach Westen. Das entspricht der übliche Definition des Kurswinkels.

Das Fahrzeug befindet sich an P_2 , die vorherige Position war P_1 .

$$(5.20) \quad P_1 = (x_1, y_1)$$

$$(5.21) \quad P_2 = (x_2, y_2)$$

$$(5.22) \quad \vec{a} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{die Nordrichtung}$$

$$(5.23) \quad \vec{b} = \overrightarrow{P_1 P_2} = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix}$$

$$(5.24) \quad \text{gesuchter Winkel} : \sphericalangle(\vec{a}, \vec{b})$$

$$(5.25) \quad \vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| * |\vec{b}| * \cos \sphericalangle(\vec{a}, \vec{b})$$

$$(5.26) \quad \vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y$$

$$(5.27) \quad \text{aus 5.25: } \cos \sphericalangle(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| * |\vec{b}|}$$

mit 5.26 ergibt sich:

$$(5.28) \quad \cos \sphericalangle(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$$

Mit der Gleichung 5.28 kann der Kurswinkel hinreichend genau bestimmt werden. Es ist wieder zu beachten, dass das GPS-Koordinatensystem nicht kartesisch ist und deshalb die Punkte vor Beginn der Berechnung in ein kartesisches System übertragen werden müssen. Als direktes Ergebnis der Gleichung wird der kleinste Winkel zwischen der Fahrtrichtung und der Nordrichtung bestimmt. Wenn sich das Fahrzeug Richtung Westen bewegt, also wenn $x_1 > x_2$, dann ist $360^\circ - \sphericalangle(\vec{a}, \vec{b})$ der gesuchte Kurswinkel, ansonsten ist $\sphericalangle(\vec{a}, \vec{b})$ direkt der Kurswinkel.

5.5 Verbesserungsalgorithmus für die Positionsbestimmung

Der Entwurf des Verbesserungsalgorithmus erfolgte anhand der Messdaten aus den Testfahrten. Zunächst wurden einzelne Verbesserungsverfahren getestet. Diese Versuche haben gezeigt, dass die Auswahl des geeignetsten Verbesserungsverfahrens aufgrund der jeweiligen Situation erfolgen muss.

5.5.1 Verbesserung auf die nächste Straße

Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben wird zu jeder gemessenen Position der nächste Punkt, der auf einer Straße liegt, bestimmt und dieser als die verbesserte Position verwendet. Allerdings nur, wenn im Suchbereich um die gemessene Position eine Straße gefunden wird. Falls keine Straße gefunden wird befindet sich die gemessene Position nicht in einem Gebiet, für das Kartendaten vorliegen. Dann wird der GPS-Punkt ohne Korrektur verwendet.

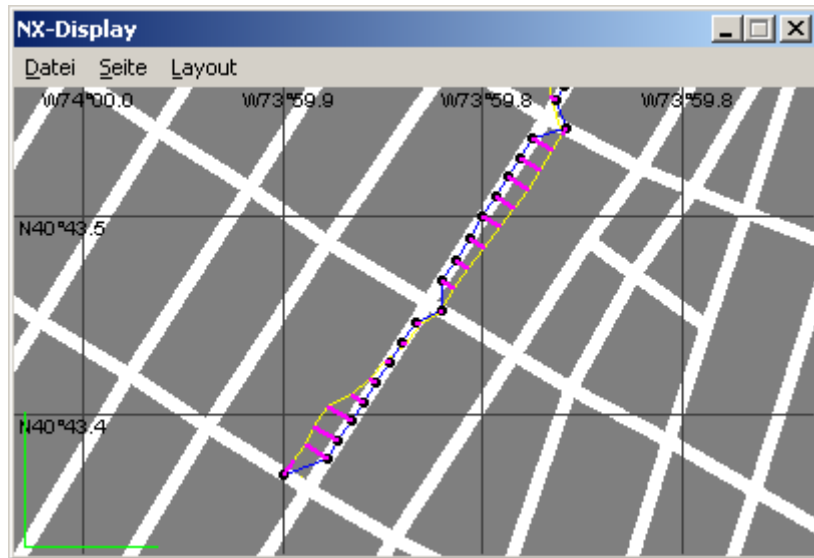


Abbildung 5.3: Position auf nächste Straße verschieben.

In Abbildung 5.3 ist zu erkennen, dass es nicht ausreicht, die Position immer auf die nächste Straße zu verbessern. Im Bild sieht man, dass die gemessenen Positionen neben der Straße liegen. Solange keine Querstraße gekreuzt wird, wird die richtige Straße ausgewählt. Beim Kreuzen einer Querstraße passiert es, dass die Querstraße näher an der zu verbessernden Position liegt, als die in Wirklichkeit gefahrene Straße. Dadurch wird eine falsche Position auf der Querstraße gewählt.

5.5.2 Verfolgung der Richtungsänderung

Sobald mehr als ein Punkt gemessen wurde lässt sich, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, die Richtung des Fahrzeugs bestimmen.

Wenn eine eindeutige Fahrtrichtung zu erkennen ist, wird die befahrene Straße fest ausgewählt. Eine Fahrtrichtung gilt als erkannt, wenn zwei aufeinanderfolgende Messungen um weniger als 10° von einander abweichen. Ein Straßenzug bleibt solange gewählt, bis sein Ende erreicht wird, oder der Kurswinkel mehrmals stark von der Straßenrichtung abweicht. Das Straßendenkriterium kann leider mit den Karlsruher Daten auch erfüllt werden, wenn keine Kreuzung in der Nähe ist, da hier Straßenzüge nicht nur an Kreuzungen enden.

Bei fest ausgewählter Straße wird die verbesserte Position dadurch berechnet, dass zunächst der Unterschied zwischen dem aktuellen Kurswinkel, und den vorherigen Kurswinkel vor der Positionsverbesserung errechnet wird. Mit dieser Winkeländerung wird aus dem vorherigen verbesserten Kurswinkel die aktuelle Richtung bestimmt.

Vom verbesserten vorherigen Punkt aus wird ein Hilfspunkt dadurch berechnet, dass die zurückgelegte Entfernung in der errechneten aktuellen Richtung aufgetragen wird. Dieser Hilfspunkt wird dann auf die ausgewählte Straße verschoben.

Dadurch, dass die Richtungsänderung statt der absoluten Richtung betrachtet wird, wirken sich Fehler bei der Richtungsmessung weniger stark aus. Solche Fehler treten beim Antaris SBR-LS auf, wenn längere Zeit kein GPS-Empfang besteht. Die gemessene Wegstrecke stimmt noch sehr genau, Kurven werden aber häufig zu stark bewertet. Dadurch wandert die gemessenen Position immer weiter aus. Wenn nur die Richtungsänderung betrachtet wird und

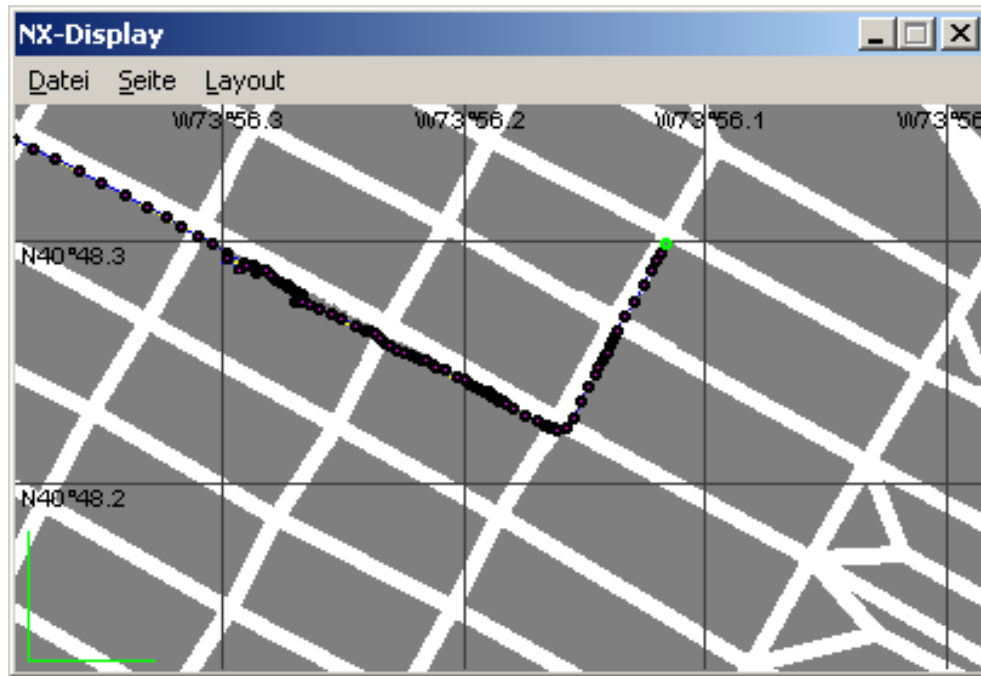


Abbildung 5.4: Aufzeichnung ohne Verbesserung.

diese Änderung auf die vorherige Richtung, die aus den verbesserten Punkten berechnet wurde, angewendet wird ist die errechnete Position bei Empfangsausfall genauer.

Bei langsamer Fahrt oder Stillstand kommt es aufgrund der Ungenauigkeit der GPS-Empfängers zur Messung von Positionen, die sogar entgegen der Fahrtrichtung liegen können. Die gemessenen Position schwanken im Rahmen der Genauigkeit des Empfängers.

Das Antaris SBR erkennt von sich aus den Stillstand des Empfängers. Es liefert in einem solchen Fall stets die gleiche GPS-Position und unterdrückt die Schwankungen. Bei Verwendung eines normalen GPS-Empfängers dagegen werden die Messungen an den Bordrechner weitergeleitet, der dann aus diesen Punkten die Fahrtrichtung bestimmt.

Als Beispiel die unverbesserte Aufzeichnung in Abbildung 5.4. Wenn hier kleine Positionsänderungen nicht gefiltert werden kommt es zu Fehlpositionierungen wie in Abbildung 5.5. Werden dagegen GPS-Punkte, die weniger als zwei Meter von der zuletzt gemessenen Position entfernt liegen, ausgefiltert so liegt die verbesserte Position auf der wirklich gefahrenen Straße wie Abbildung 5.6 zeigt.

5.5.3 Straßenauswahl bei bekanntem Kurswinkel

Um Straßen nahe bei der aktuellen Position zu suchen werden zunächst alle in Frage kommenden Kacheln um die aktuelle Position ausgewählt. Die Kachelauswahl ist in Abschnitt 5.1.2 beschrieben.

Für jeden Straßenzug muss für alle Teilgeraden der Abstand zur aktuellen Position berechnet werden. Werden mehrere Straßen nahe bei der aktuellen Position gefunden wird die Straße, deren Richtung mit der Fahrtrichtung besser übereinstimmt bevorzugt. Allerdings darf das Winkelkriterium nicht zu stark gewichtet werden, da sonst bei nebeneinander verlaufenden Straßen nicht die Nähere, sondern die mit dem geringfügig besseren Winkel gewählt wird. Eine Winkelbetrachtung ist nur möglich, wenn schon ein gültiger Kurswinkel bekannt ist. Da die

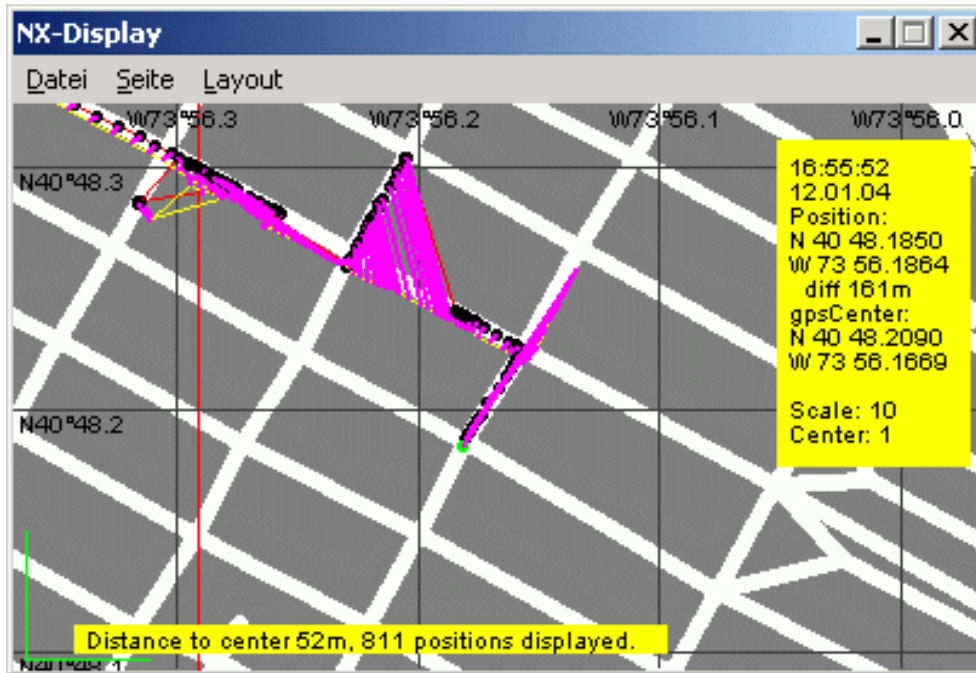


Abbildung 5.5: Durch Winkelverfolgung verursachte Fehlpositionierung.

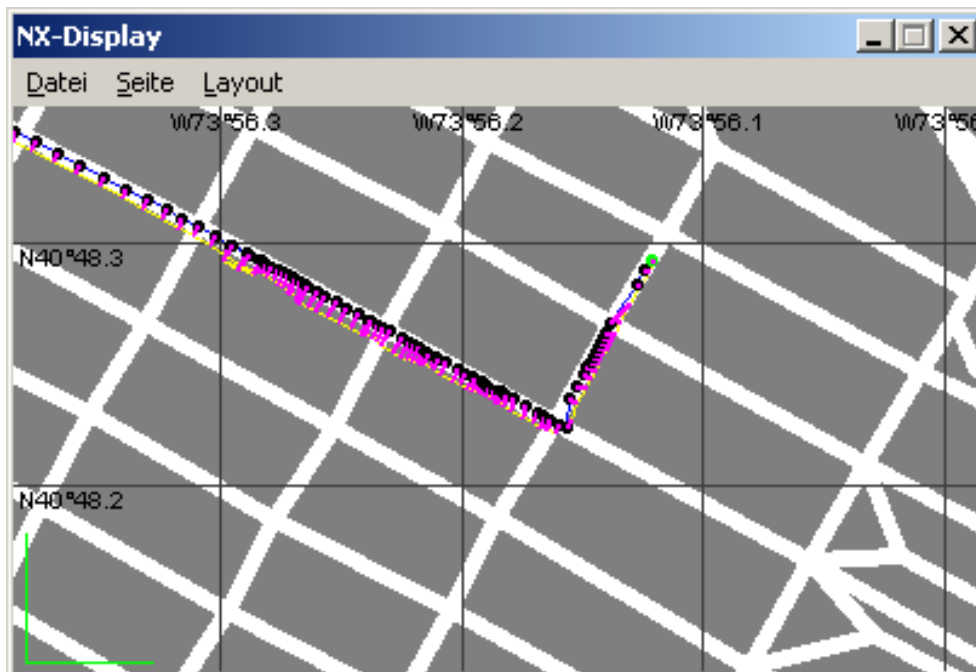


Abbildung 5.6: Kleine Positionsänderungen werden ignoriert.

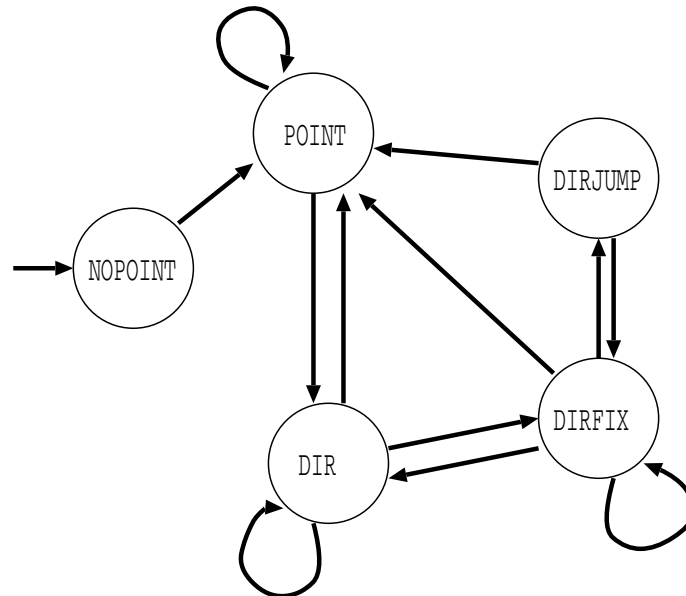


Abbildung 5.7: Zustandsautomat der Positionsverbesserung.

Straßen in den Daten ohne Richtungsangaben vorliegen, liegt ihre Richtung immer zwischen 0° und 180° . Falls der Kurswinkel größer ist, muss die Gegenrichtung zum Vergleich verwendet werden.

5.5.4 Kombiniertes Verfahren

Falls eine Sensorunterstützung der Positionsbestimmung mittels Gyroskop und Wegimpuls gewünscht wird, wird das Antaris SBR-LS eingesetzt. Die Verbesserung des GPS-Signals erfolgt transparent, der Bordrechner erhält immer NMEA-Daten. Sowohl bei Verwendung eines Standard-GPS-Empfängers, als auch bei Einsatz des Antaris SBR-LS ist eine Verbesserung der gemessenen Position durch Software erforderlich.

Das anzuwendende Verfahren zur Positionsverbesserung durch Software ist abhängig davon, ob bereits Messwerte vorliegen, oder nicht. Die verschiedenen Fälle werden auf Zustände eines endlichen Automaten abgebildet. Die Zustände des Automaten sind in Tabelle 5.5 aufgelistet, die Bedingungen für Zustandsübergänge in Tabelle 5.6. Der Automat ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

In jedem Zustand wird, falls die korrigierte Position über 100m von der gemessenen Position entfernt ist, nichtmehr korrigiert, sondern das Verfahren neu initialisiert. Das bedeutet, die Historie wird verworfen und es wird am aktuellen Messpunkt neu angefangen. Im Test war das nur bei Verwendung eines „normalen“ Empfängers erforderlich. Durch dieses Verfahren wird verhindert, dass sich ein von einer GPS-Empfangsstörung verursachter Fehler unbegrenzt lange auf die Verbesserung auswirkt. Messpunkte, die weniger als zwei Meter von der zuletzt gemessenen Position entfernt sind werden nicht verwendet, um die in 5.5.2 beschriebenen Fehler durch Schwankungen bei der GPS-Messung zu vermeiden. Falls der Abstand von der aktuellen gemessenen Position zur vorherigen gemessenen Position größer als 70m ist wird das Verfahren ebenfalls neu initialisiert, da bei Messung eines GPS-Punktes pro Sekunde ein solcher Abstand nur bei einer Geschwindigkeit von mehr als 250km/h erreichbar wäre.

Die Positionsbestimmung des Antaris SBR-LS springt nur, wenn wieder GPS-Empfang besteht und erkannt wird, dass die mittels Kopplenavigation bestimmte Position nicht korrekt ist. Ein

Zustand	Beschreibung	Verbesserung
STATE_NOPOINT	noch keine Punkt gemessen	auf Straße verschieben
STATE_POINT	mindestens ein gültiger Punkt	auf Straße verschieben
STATE_DIRFIX	Straße fest ausgewählt	Messwert um zurückgelegte Entfernung in neue Richtung verschieben
STATE_DIRJUMP	abweichende Richtung	auf Straße verschieben oder Messwert um zurückgelegte Entfernung in neue Richtung verschieben
STATE_DIR	Richtung bekannt	auf Straße verschieben

Tabelle 5.5: Zustände der Positionsverbesserung

alter Zustand	Bedingung	neuer Zustand
STATE_NOPOINT	messen eines gültigen Punktes	STATE_POINT
STATE_POINT	Kurswinkel berechenbar	STATE_DIR
STATE_POINT	kein Kurswinkel berechenbar	STATE_POINT
STATE_DIRFIX	neue Richtung \neq alte Richtung	STATE_DIRJUMP
STATE_DIRFIX	neue Richtung \approx alte Richtung	STATE_DIRFIX
STATE_DIRFIX	Straßenende erreicht	STATE_DIR
STATE_DIRFIX	Sprung $> 100\text{m}$	STATE_POINT
STATE_DIRJUMP	wieder alte Richtung	STATE_DIRFIX
STATE_DIRJUMP	andere Richtung	STATE_DIR
STATE_DIR	gleiche Richtung wie vorher	STATE_DIRFIX
STATE_DIR	neue Richtung \neq alte Richtung	STATE_DIR
STATE_DIR	Sprung $> 100\text{m}$	STATE_POINT

Tabelle 5.6: Zustandswechsel bei der Positionsverbesserung

Sprung von über 70m deutet also beim Antaris SBR-LS darauf hin, dass die aktuelle Position ein deutlich besserer Messwert als die vorherige Position ist. Beim normalen GPS-Empfänger ist nicht klar, ob der Punkt nach dem Sprung besser oder schlechter als vorher ist.

Die verschiedenen Situationen die bei der Positionsverbesserung unterschieden werden müssen, sind die folgenden:

Falls noch kein Punkt gemessen wurde, wird die Position auf die nächste Straße verschoben, wenn sich eine Straße in akzeptabler Entfernung befindet. (STATE_NOPOINT)

Auch wenn bisher nur ein Punkt gemessen wurde, wird die Position nur auf die nächste Straße verschoben. Mit zwei unterschiedlichen Punkten kann der Kurswinkel bestimmt werden. (STATE_POINT)

Bei bekanntem Kurswinkel wird der neue Punkt ebenfalls auf die Straße verschoben. Der Kurswinkel wird als zusätzliches Kriterium zur Straßensuche verwendet. Wenn der neue Kurswinkel vom vorherige Kurswinkel weniger als 10° abweicht, wird die aktuelle Straße fest ausgewählt. (STATE_DIR)

Wenn eine Straße fest ausgewählt wurde ergibt sich die neue Position aus der alten dadurch, dass vom alten Punkt aus der zurückgelegte Weg aufgetragen wird und diese Position auf die gewählte Straße verschoben wird. Es ist zu überprüfen, ob der Kurswinkel zu sehr von der Richtung der Straße abweicht und ob das Ende der Straße erreicht ist. (STATE_DIRFIX)

Wenn die zuletzt gemessenen Richtung zu stark von der Richtung der gewählten Straße abgewichen ist wird überprüft, ob die jetzt gemessene Richtung wieder mit der gewählten Straße übereinstimmt. Falls eine Übereinstimmung besteht, erfolgt die Positionsverbesserung wie im Fall STATE_DIRFIX. Andernfalls wird der neue Punkt auf die nächste Straße verschoben, wobei der Kurswinkel bei der Straßensuche berücksichtigt wird. (STATE_DIRJUMP)

5.6 Bewertung des Verbesserungsalgorithmus

In der endgültigen Version des Verbesserungsverfahrens wird zu jeder Situation eine angemessene Korrekturfunktion ausgeführt. Die Parameter, wie die Größe des Suchrechtecks oder die maximal zulässige Abweichung, wurden experimentell ermittelt. Mit weiteren Testdaten ist eine bessere Feineinstellung des Verfahrens zu erwarten. Das Verfahren ist so eingestellt, dass es in allen vorliegenden Testfällen eine Verbesserung der Position ermöglicht. Problematisch ist nur, wenn sich das Fahrzeug auf nicht in den Straßendaten verzeichneten Parkplätzen bewegt, da auch dann die Position auf die nächste bekannte Straße „verbessert“ werden. Abhilfe schafft nur eine Erweiterung der Kartendaten um diese Plätze. Der Verbesserungsalgorithmus wurde so entworfen, dass er sowohl mit dem Antaris SBR-LS, als auch mit einem Standard-GPS-Empfänger funktioniert. Beim Einsatz eines Standard-GPS-Empfängers ist allerdings eine geringere Genauigkeit zu erwarten.

Kapitel 6

Ergebnisse

Bei den Sensoren hat sich die Verwendung eines Gyroskops in Verbindung mit der Auswertung des Wegimpuls als die am einfachsten zu realisierende Methode zum nachträglichen Einbau in Fahrzeuge gezeigt. Die Lokalisierung im Mobilfunknetz liefert nicht die notwendige Genauigkeit, so dass es zur GPS-Ortung keine Alternative gibt.

Das Antaris SBR-LS von u-Blox ist eine gute Fertiglösung, die sowohl GPS-Empfänger als auch weitere Positionsbestimmung ohne GPS-Empfang durch Koppelnavigation bietet.

Die Kartendaten können speicherplatzsparend auf dem Bordrechner abgelegt werden. Die Dateigröße beträgt nur noch etwa 10% der Ausgangsgröße. Die Positionsverbesserung läuft schnell genug ab, um sie in Echtzeit durchzuführen. Im realen Betrieb liefert der GPS-Empfänger jede Sekunde eine neue Position. Im Test mit einem GPS-Simulator wurden auch 10 Position je Sekunde noch verarbeitet.

Die Kartenstützung zusammen mit der Hardwarelösung führt zu einer deutliche Verbesserung der Positionsbestimmung. Die Implementierung wurde mit aufgezeichneten GPS-Daten von Testfahrten geprüft.

Die Implementierungsphase hat gezeigt, wie wichtig ein modularer Aufbau komplexer Systeme ist. Dank dieses modularen Aufbaus konnte die Positionsverbesserung in das Gesamtsystem integriert werden, ohne andere Module anzupassen.

Die Testergebnisse zeigen, dass mit einer Kombination aus Sensoren, GPS und Kartenstützung eine deutliche Verbesserung der Positionsbestimmung möglich ist.

Kapitel 7

Ausblicke

Über diese Diplomarbeit hinaus sind weitere Verbesserungen denkbar. Durch zusätzliche Auswertung des Wegimpuls kann die zurückgelegte Distanz laut GPS-Empfänger mit der zurückgelegten Distanz laut Wegimpuls verglichen werden. Zu größeren Abweichungen bei Verwendung eines kalibrierten u-Blox Empfängers kommt es, wenn eine Abweichung zwischen errechneter Position und GPS-Position festgestellt wurde. Das kann nach längerem Empfangsausfall der Fall sein. Die Position nach dem Sprung ist besser, als die vorher.

Bei einem GPS-Empfänger ohne Stützung ist eine Abweichung ein Indiz für eine Empfangsstörung. Ob der Sprung aber auf eine schlechtere Positionsbestimmung zurückzuführen ist, oder ob es der Rücksprung nach passieren einer Reflexion war, lässt sich nicht feststellen.

Um Algorithmen, die die Wegmessung direkt berücksichtigen, zu testen, wird eine erweiterte Wegimpulssimulation benötigt. Die signalisierten Impulse müssen zu den GPS-Positionen passen. Eine gleichzeitige Aufzeichnung von Wegimpulsen und GPS-Koordinaten bei Testfahrten ist erforderlich.

Der Bordrechner sollte in der Lage sein, den Kalibrierungsstand des Antaris SBR-LS Empfängers auszulesen. So können Fahrzeuge, die nicht kalibriert sind, leicht gefunden und gezielt manuell kalibriert werden.

Bisher ist die grafische Kartenanzeige nur zu Fehlersuche geplant. Gerade im Ruftaxibetrieb könnte sie aber auch zur Orientierung verwendet werden. Dann wäre eine Erweiterung der Kartendaten um Straßennamen sinnvoll.

Tabellenverzeichnis

5.1	Auswirkung der Kachelgröße auf die Dateigröße: New York	31
5.2	Auswirkung der Kachelgröße auf die Dateigröße: Karlsruhe	31
5.3	Auswirkung der Kachelgröße auf mehrfach abgelegte Straßen: New York	32
5.4	Auswirkung der Kachelgröße auf mehrfach abgelegte Straßen: Karlsruhe	32
5.5	Zustände der Positionsverbesserung	43
5.6	Zustandswechsel bei der Positionsverbesserung	43

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über das Produktspektrum der Firma INIT (aus [1])	9
4.1	Funktionsschema des Murata-Kreisels (aus [5])	16
4.2	2D Positionsbestimmung mit 3 Satelliten und Korrektur des Uhrenfehlers (aus[18])	18
4.3	Sphärische Koordinaten (aus [3])	19
4.4	Testaufbau mit Antaris SBR-LS.	23
4.5	Antaris SBR-LS ohne GPS-Empfang	24
4.6	Antaris SBR-LS mit GPS-Empfang	24
4.7	Testfahrt mit Navigates NGH-200	25
4.8	Weg der Testfahrt mit Antaris SBR-LS.	26
4.9	Messung der Strecke mit Antaris SBR-LS ohne ausreichende Kalibrierung des Gyrosensors.	27
5.1	Auswahl der Kacheln abhängig von der Position.	33
5.2	Kartenanzeige auf dem Fahrerdisplay im Debug-Modus.	35
5.3	Position auf nächste Straße verschieben.	39
5.4	Aufzeichnung ohne Verbesserung.	40
5.5	Durch Winkelverfolgung verursachte Fehlpositionierung.	41
5.6	Kleine Positionsänderungen werden ignoriert.	41
5.7	Zustandsautomat der Positionsverbesserung.	42

Literaturverzeichnis

- [1] INIT Innovation in Traffic Systems AG (2003): Unternehmen. <http://www.init-ka.de/de/unternehmen/unternehmen.php> → Seite 8, 9, 48
- [2] INIT Innovation in Traffic Systems AG (2002): COPILOTpc. http://www.init-ka.de/de_produkte/m_copilotpc.php → Seite 8
- [3] Ebner, Dirk (1996): Einbindung von Satellitenortung in die Positionsbestimmung von Fahrzeugen des ÖPNV. → Seite 11, 19, 48
- [4] u-blox ag, (2003): SBR-LS, GPS Sensor-Based Receiver Board. http://www.u-blox.com/products/sbr_ls.html → Seite 23
- [5] Prof. Dr. von Puttkamer, Ewald (1999): Vorlesungsskript Autonome Mobile Roboter. Kapitel 2.2 <http://ag-vp-www.informatik.uni-kl.de/Papers/skriptamr/contents.html> 16, 48
- [6] Fuchs, Alois; Mackert, Manfred; Ziegler, Gisela (1983): EFA-Netzabbildung und Routensuche für fahrzeugautonomes Ortungs- und Navigationssystem. In Nachrichtentechnische Zeitschrift, Bd. 36 (1983), Heft 4, S 220–223 → Seite 16
- [7] Galactics (1997): Navstar <http://collections.ic.gc.ca/satellites/english/function/navigati/navstar.html> → Seite 17
- [8] Weston, Ed (2001): 2-D vs. 3-D Fixes. <http://www.gpsnuts.com/myGPS/GPS/Technical/ed.htm> → Seite 17
- [9] Neupert, Ulrike (2000): GPS – Der Stand der Satellitennavigation. <http://leute.server.de/ulrik/Landrover/gps.html> → Seite 18
- [10] Rübke-Doerr, Peter (2003): Navigation mit Satelliten, Grundlagen des Global Positioning Systems. In: c't 03/1, S. 150 → Seite 18
- [11] DAFU Datenfunk: DGPS (differential GPS), <http://www.dafu.de/redirect/dgps.html> → Seite 20
- [12] European Organisation for the Safety of Air Navigation: WGS 84, World Geodetic System 1984 <http://www.wgs84.com/> → Seite 18
- [13] <http://www.ap.univie.ac.at/users/kaindl/error/> Fehlerbetrachtung zur Positionsbestimmung mit GPS Gerhard Kaindl Stand Mai 2000, Entwurf → Seite 19
- [14] Interagency GPS Executive Board, 2001: Frequently Asked Questions About SA Termination. <http://www.igeb.gov/sa/faq.shtml> → Seite 19

- [15] Yeazel, Jake (2003): WAAS and its Relation to Enabled Hand-Held GPS Receivers. <http://gpsinformation.net/exe/waas.html> → Seite 19
- [16] Linke, Wolfgang (2003): Orientierung mit Karte, Kompass, GPS. 11., durchgehend überarbeitete Auflage, Verlag Busse + Seewald → Seite 19
- [17] Pfeifer, Heinrich (2003): Eine Langzeitmessung mit GPS und GARtrip. http://www.gartrip.de/long_d.htm → Seite 19
- [18] Köhne, Anja; Wöbner, Michael (2003): GPS-Info, GPS – Global Positioning System. <http://www.kowoma.de/gps/> → Seite 18, 19, 48
- [19] Stadler, Matthias (1997): GLONASS (Global Navigation Satellites System) <http://www.swix.ch/solg/gps/glonass.htm> → Seite 20
- [20] Ott, Bjoern (1999): Hochpräzise Navigation mit GPS/GLONASS. http://ifen1.bauw.unibw-muenchen.de/Forschung/GLONASS_de.shtml → Seite 20
- [21] Russian Federation Ministry of Defence (2003): Coordinational Scientific Information Center. <http://www.glonass-center.ru/> → Seite 20
- [22] Lindborg, Christina (2003): GLONASS – Russia and Navigation Systems. <http://www.fas.org/spp/guide/russia/nav/glonass.htm> → Seite 20
- [23] Centre National d' Études Spatiales (1999–2000): L'architecture de GALILEO, Le principe de fonctionnement. <http://www.cnes.fr/activites/programmes/galileo/1principe.htm> → Seite 20
- [24] European Space Agency (2003): News on Navigation Satellite Application, How to build up a constellation of 30 navigation satellites. http://www.esa.int/export/esaSA/ESAV577708D_navigation_0.html → Seite 20
- [25] European Space Agency (2003): News on Navigation Satellite Application, What is EGNOS? http://www.esa.int/export/esaSA/GGG63950NDC_navigation_0.html → Seite 20
- [26] European Space Agency (2004): ESTB SIS Broadcast Schedule, <http://esamultimedia.esa.int/docs/egnos/estb/schedule.htm> → Seite 20
- [27] Bager, Jo (2001): Das Handy kennt den Weg, Location Based Services machen das Mobiltelefon zum universellen Wegweiser. In: c't 01/22, S. 168 <http://www.heise.de/ct/01/22/168/> → Seite 21
- [28] Bager, Jo; Gleich, Clemens (2001): Such, Handy! Location Based Services im Test. In: c't 01/22, S. 172 → Seite 21
- [29] Charny, Ben (2002): Last chance for E911 technology. In: CNET News.com <http://news.com.com/2100-1033-928153.html> → Seite 21
- [30] 3G Phones (2004): World's First A-GPS Navigation System for 3G. <http://www.3g.co.uk/PR/Jan2004/6345.htm> → Seite 21
- [31] Dowideit, Martin (2000): Dein Handy auf Sendung, Mobilfunkortung – Segen oder Schrecken? In: Internetmagazin Firstsurf 52/2000, 27. Dezember http://www.firstsurf.com/dowideit0052_t.htm → Seite 22

- [32] Federal Communications Commission (2003): FCC Consumer Advisory, What You Need to Know About Calling 911 From Your Wireless Phone. <http://ftp.fcc.gov/cgb/consumerfacts/e911.html> → Seite 22
- [33] Sirf News (2003): Innovative GPS-Technologie zur Standortbestimmung, für höhere Sicherheit und besseren Komfort im Alltag. http://www.unitronic.de/news/sirf/GPS_news.htm?news_id=448 → Seite 22
- [34] Phyttec Telematik GmbH (2002): NAVIgates NGH 200, Koppelnavigation und Real-Time-GPS. <http://www.phyttec.de/telematik/produkte/gps/gyro.htm> → Seite 25
- [35] U.S. Census Bureau (2002–2004): TIGER, Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing system. <http://www.census.gov/geo/www/tiger/> → Seite 28
- [36] ESRI (1998): ESRI Shapefile Technical Description, An ESRI White Paper. <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> → Seite 28
- [37] U.S. Census Bureau (2002): TIGER/Line Files, Technical Documentation. <http://www.census.gov/geo/www/tiger/tiger2002/tgr2002.pdf> → Seite 28