

# Diplomarbeit

Henning Tegeler

## Assistenzsystem zum Manövrieren von Yachten

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Informations- und  
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Information and  
Electrical Engineering*

# Henning Tegeler

## Assistenzsystem zum Manövrieren von Yachten

Diplomarbeit eingereicht im Rahmen der Diplomprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
Studienrichtung Kommunikationstechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Henry Reetmeyer  
Zweitgutachter : Prof.-Ing. Joachim Goerth

Abgegeben am 17. Dezember 2007

**Henning Tegeler**

**Thema der Diplomarbeit**

Assistenzsystem zum Manövrieren von Yachten

**Stichworte**

Optimierung, Navigation, Yacht, Regelung, GPS

**Kurzzusammenfassung**

Inhalt dieser Diplomarbeit ist ein Assistenzsystem für die Steuerung von Yachten im Hafen. Dieses Assistenzsystem, ein Software-Programm, soll den Kapitän unterstützen eine Yacht im Hafen so zu steuern, dass sie eine gewünschte Anlegestelle möglichst genau erreicht. Hierzu ist es notwendig, die Steuereingriffe der Yacht zu optimieren. Das Optimierungsverfahren wird im Rahmen dieser Diplomarbeit an einem theoretischen Schiffsmodell untersucht und mit einem numerischen Suchalgorithmus durchgeführt.

Die Erfassung der jeweiligen Yachtposition wird per GPS vorgenommen.

**Henning Tegeler**

**Title of the paper**

Assistant for the navigation of a yacht

**Keywords**

optimization, navigation, yacht, control, GPS

**Abstract**

In this thesis, a system for the navigation of a yacht in a harbour is developed. This is done by a software which assists the captain at his work. The software helps to reach a desired landing stage by the optimization of the control variables of a simulated trip. The optimization is achieved by a numerical downhill simplex algorithm.

The measurement to achieve the yacht's position is done by the GPS-system.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung des Themas der Diplomarbeit</b>	<b>6</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>3 Grundlagen des Global Positioning Systems (GPS)</b>	<b>10</b>
3.1 Informationsübertragung . . . . .	10
3.1.1 Modulation und Codierung . . . . .	11
3.1.2 Sendung und Ausbreitung . . . . .	14
3.2 GPS-Antennen und GPS-Empfänger . . . . .	15
3.2.1 Dekodierung der Satellitennachricht . . . . .	16
3.3 Berechnung der Position . . . . .	16
3.4 Messgenauigkeit . . . . .	18
3.5 Koordinatensysteme . . . . .	18
3.5.1 Koordinatensysteme der Erde . . . . .	18
3.5.2 Vermessung . . . . .	20
3.5.3 World Geodetic System 1984 (WGS-84) . . . . .	20
3.5.4 Mercatorformat . . . . .	20
3.6 Datenformate . . . . .	21
3.7 Differential GPS . . . . .	22
3.7.1 Satellitenpositionierungsdienst . . . . .	23
3.7.2 Bedeutung für die Yachtnavigation . . . . .	24
<b>4 Geographische Gegebenheiten</b>	<b>25</b>
4.1 Navigationsproblematik . . . . .	25
4.2 Daten und Position der Yacht . . . . .	26
4.2.1 Yachtposition . . . . .	27
4.2.2 Schiffsmodell . . . . .	27
<b>5 Zielbestimmung und Navigationssystem</b>	<b>29</b>
5.1 Steuerungsvorschläge . . . . .	29
5.1.1 Vergleich mit der Steuerung eines PKWs . . . . .	30
5.2 Hardware und Software . . . . .	31

---

5.2.1	GPS-Empfänger . . . . .	31
5.2.2	Programmiersprache . . . . .	32
5.2.3	Design . . . . .	33
5.2.4	Ansprechen der seriellen Schnittstelle . . . . .	37
5.3	Fusion von Sensordaten und Positionskorrektur . . . . .	38
5.4	Algorithmus zum Erreichen der Anlegestelle . . . . .	39
5.4.1	Ermittlung von Anlegelinie (Trajektorienplanung) und Aktordaten (Näherung) . . . . .	39
5.4.2	Anzeige der Stellgrößen . . . . .	44
5.5	Optimierung der Aktordaten (Präzision) . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Programmfunktionalität und Tests</b>	<b>55</b>
6.1	Tests zur Fehleroptimierung . . . . .	55
6.2	Benutzung des Programms . . . . .	58
6.2.1	Bedienung und Umgang mit dem Programm . . . . .	59
6.3	Mögliche Fehlweisungen . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>61</b>
7.1	Empfehlungen . . . . .	61
7.2	Mögliche Erweiterungen . . . . .	62
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>64</b>
8.1	Bilder . . . . .	64
8.2	Inhalt der beiliegenden CD-ROM . . . . .	64
8.2.1	Programmcode . . . . .	65
8.2.2	Programm . . . . .	66
<b>9</b>	<b>Glossar</b>	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>69</b>

## 1 Zusammenfassung des Themas der Diplomarbeit

Diese Diplomarbeit entstand an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg im Wintersemester 2007/2008. Ziel dieser Arbeit ist, ein Assistenzsystem zu entwickeln, welches einen Steuermann beim Anlegemanöver mit einer Yacht im Hafen unterstützt. Es soll eine bestimmte Position (endgültiger Liegeplatz) erreicht werden. Mit dem Assistenten soll dem Steuermann ermöglicht werden, einfach und sicher die letzten wenigen Meter vor dem Liegeplatz zurückzulegen und möglichst genau die Wunschposition zu erreichen.

Das Assistenzsystem soll als Software-Programm mit grafischer Oberfläche für den PC entwickelt werden.

Die Navigation soll von einem Computer automatisiert durchgeführt werden. Die Positionen im Hafenbecken (Koordinaten) werden anhand von Satelliten-Navigation (GPS) ermittelt. Zusätzlich ist eine mit Koordinaten versehene Karte von dem Hafengebiet vorhanden. Als Aktoren stehen Ruder und Motor der Yacht zur Verfügung. Um Motor und Ruder anzusteuern muss ein passender Algorithmus entwickelt werden.

Das Anlegemanöver soll vorab simuliert werden und aus der Simulation sollen Werte berechnet werden welche das Anlegemanöver verbessern. Das System soll nicht autark sein, das heißt, die Steuerung der Yacht kann weiterhin vom Menschen durchgeführt werden.

In der Abbildung 1 ist die Aufgabenstellung schematisch dargestellt, 'x' ist hierbei die Schiffposition, 'o' die abweichende GPS-Position und '#' die Zielposition. Das Schiff 'x' soll automatisiert zum Ziel '#' geführt werden; hierfür muss gewährleistet sein, dass zwischen 'x' und 'o' während der Zeit der Zielführung der Abstand erhalten bleibt.

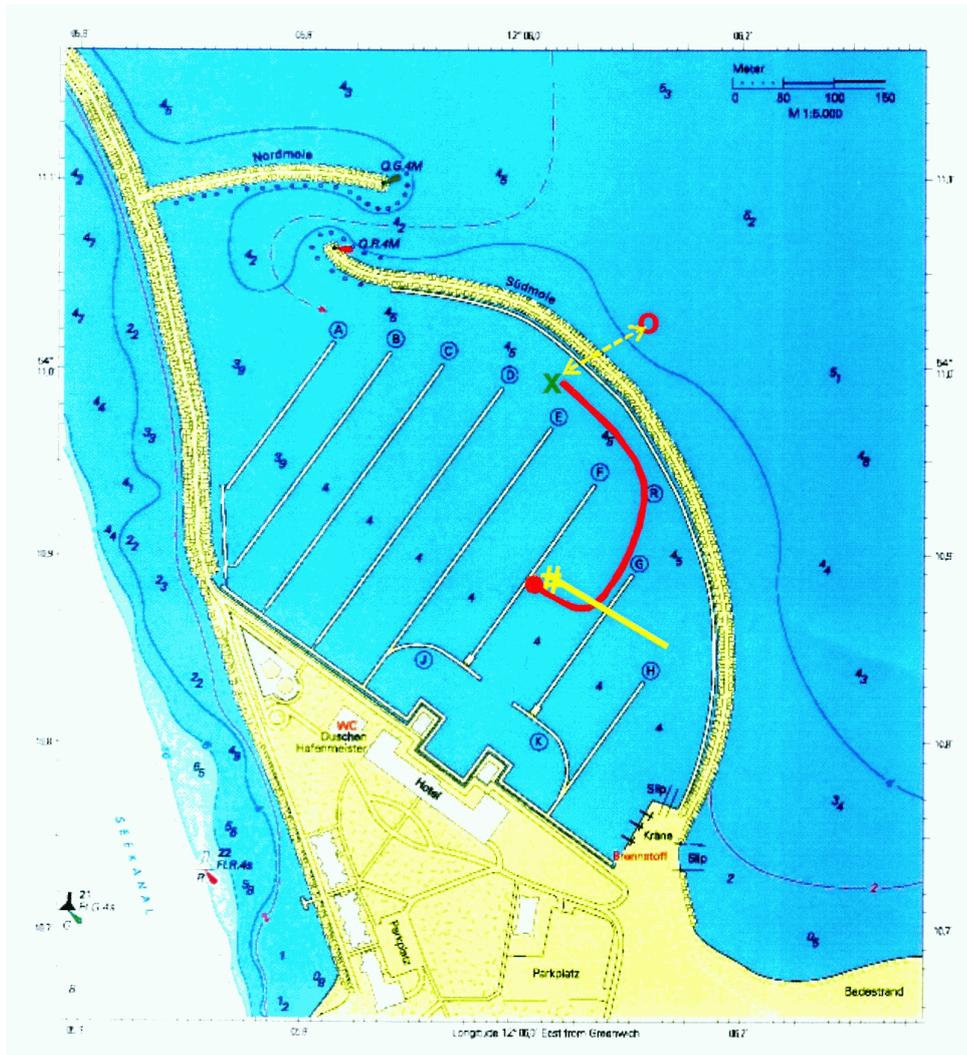


Abbildung 1: Hafenkarte

## 2 Einleitung

Das Führen von Schiffen in Hafengebieten ist auch für erfahrene Kapitäne eine große Herausforderung. Der Weg zum GPS (Global Positioning System), durch dessen Hilfe sich heutzutage per Knopfdruck die genaue Position eines Schiffes anzeigen lässt, ist lang und stellt gleichzeitig den Stand der vorhandenen Technik im Laufe der Geschichte dar.

In der frühen Seefahrt orientierte man sich an naturbedingten Gegebenheiten. Seit dem 15. Jahrhundert galt der Kompass auf allen Schiffen als ein enormer Fortschritt.

Die Entwicklung der Funknavigation im 20. Jahrhundert machte eine wetterunabhängige genaue Positionsbestimmung ohne Himmelskörper möglich.

Im 2. Weltkrieg gelangte die Radartechnik (**R**adio **D**etecting **a**nd **R**anging) zum Durchbruch. Beim Radar werden reflektierte hochfrequente Signale gesendet und empfangen. Diese werden anschließend ausgewertet. Je schneller die reflektierten Signale wieder empfangen werden, desto näher ist ein Objekt.

Seit den 1970er Jahren spielen Satellitensysteme zur Positionsbestimmung in der Schiffsnavigation eine große Rolle. Diese ursprünglich aus dem militärischen Bereich entwickelten Systeme werden heutzutage auf fast allen Schiffen und Yachten genutzt. Zwei wesentliche Satellitennavigationssysteme stehen zurzeit zur Verfügung: das „**NAV**igation **S**ystem using **T**ime **A**nd **R**anging - **G**lobal **P**ositioning **S**ystem“ (**NAVSTAR-GPS**) der USA und das russische System „**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystem“ (**GLONASS**). Die beiden Systeme beruhen grundsätzlich auf demselben Prinzip und unterscheiden sich nur durch einige technische Details. Auch das für die Zukunft von oben genannten Systemen unabhängige europäische System „**Galileo**“, das im Jahr 2013 betriebsbereit sein soll, soll größtenteils zu den bestehenden Systemen kompatibel sein.

Der Weiterentwicklung auf diesem Gebiet kommt eine sehr große Bedeutung zu, da die Anforderungen bei der Positionsbestimmung hinsichtlich Genauigkeit, Komfort und Verfügbarkeit immer weiter gestiegen sind, was auch für das Navigieren bzw. Manövrieren von Yachten und Schiffen in Häfen durch enge Fahrwege und viel befahrene Strecken sehr wichtig ist. Diese, nicht einfache, Aufgabe für den Kapitän soll durch ein Assistenzsystem gelöst werden, welches die Möglichkeit bietet, diese Präzisionsaufgabe zu übernehmen. Hierbei ist es erforderlich, eine genaue Regelung des Antriebs der Yacht vorzunehmen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll hierfür ein Optimie-

rungsverfahren verwendet werden, welches anhand eines Modells für ein Schiff überprüft und verbessert wird, so dass es für den Einsatz auf einer Yacht geeignet ist.

Das mathematische Schiffsmodell „SUSAN“ ist bereits entwickelt und wird zunächst als gutes Modell für das Schiffsverhalten genommen.

In dem ersten Teil dieser Diplomarbeit soll das NAVSTAR Global Positioning System kurz vorgestellt werden. Hierbei wird auch auf die Funktion eines GPS-Empfängers eingegangen, sowie auf Modulation und Kodierung der Satellitendaten. Der Schluss des ersten Kapitels beschäftigt sich mit dem differentiellen GPS (DGPS), welches zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit herangezogen werden kann. Der wesentliche Teil der Diplomarbeit wird im Kapitel 4 der Lagebestimmung und im Kapitel 5 der Navigation einer Yacht gewidmet. Hier geht es im Wesentlichen um die Erstellung eines Algorithmus, welcher aus den Sensordaten die Stellgrößen für Ruder und Schub ermittelt, diese anzeigt und den Aktoren übergibt. Hierbei werden Vorgehensweise und Programmieretechniken für die Programmierung des Manövrierassistenten vorgestellt. Auch wird im Einzelnen darauf eingegangen wie es zu dem vorgeschlagenen Navigationskurs kommt.

Es werden Möglichkeiten angesprochen, wie der Navigationskurs angesteuert werden kann und ein Verfahren vorgestellt, welches die Möglichkeit bietet, aus Erfahrungswerten die Steuergrößen für den Navigationskurs zu verbessern (Optimierungsverfahren).

Programm- und Systemtests, sowie Bedienungshinweise schließen die Diplomarbeit ab.

### 3 Grundlagen des Global Positioning Systems (GPS)

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Global Positioning Systems (GPS) beschrieben, insbesondere die für diese Arbeit interessanten Themen wie Genauigkeit und Anbindung der GPS-Empfänger an einen Computer.

Das globale Positionierungssystem GPS hat seine Ursprünge beim amerikanischen Militär. Es ist für die Positionsbestimmung und Steuerung von Waffensystemen (hauptsächlich Lenkraketen) entwickelt worden. Seit 1973 entwickelt, wurde es am 17. Juli 1995 vollständig unter dem Namen „NAVigation System using Time And Ranging - Global Positioning System“ (NAVSTAR-GPS) in Betrieb genommen.

Für die Funktion sind 24 Satelliten zuständig. Diese kreisen jeweils in 20183 km Höhe auf sechs Bahnen gleichmäßig verteilt zweimal am Tag um die Erde, so dass mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen werden können. Die Satelliten haben ihren eigenen Identifikationscode und sind mit präzisen Atomuhren ausgestattet. Sie senden Signalfolgen aus, die Informationen über den Identifikationscode, die exakte Uhrzeit und die Positionsdaten enthalten.

Der Empfänger dieser ausgesendeten Informationen ist in der Lage, hieraus seine eigene Position zu errechnen. Drei Satelliten werden benötigt, um eine dreidimensionale Position zu errechnen und ein Satellit für die genaue Bestimmung der Zeit.

Für die Navigation auf See würden theoretisch insgesamt drei Satelliten genügen, da sich die Meereshöhe kaum ändert und daher eine zweidimensionale Navigation ausreichen würde. Zur vollständigen dreidimensionalen Ortung (wie sie bei Objekten in der Luft erforderlich ist) wird jedoch eine Position der Vollständigkeit halber grundsätzlich durch drei Koordinaten bestimmt. Da die Höhenkoordinate nicht benötigt wird, ließe sich mit ihr aber eine Abschätzung der Güte der Längen- und Breiten-Koordinate machen.

#### 3.1 Informationsübertragung

Es wird im Folgenden beschrieben, wie die Daten vom Satelliten zum Empfänger gelangen. Das Kapitel wird unterteilt in Modulation und Codierung (Kapitel 3.1.1), sowie Sendung und Ausbreitung (Kapitel 3.1.2). Angesprochen werden Themen wie Sendeleistung, Antennen und physikalische Einflüsse bei der Übertragung des Signals wie Mehrwegeausbreitung und Beugung.

### 3.1.1 Modulation und Codierung

Um Daten per Funk übertragen zu können, müssen sie moduliert werden. Das heißt, diese Daten verändern die Eigenschaften einer hochfrequenten Trägerschwingung. Theoretisch können hierbei Amplitude, Frequenz oder Phase verändert werden. Beim GPS verwendet man eine Phasenmodulation, genauer gesagt **Binary Phase Shift Keying (BPSK)**, bei der je nach vorkommender binärer Daten (0 oder 1) die Phase des Trägers entweder um  $180^\circ$  gedreht wird oder unverändert bleibt. Dies wird in Abbildung 2 deutlich.

Beim GPS sind zwei Trägerfrequenzen aus dem *L-Band* (600 MHz bis 1,6 GHz) im Einsatz. Der Einsatz einer dritten Trägerfrequenz befindet sich in Planung (siehe Tabelle 1). Selbstverständlich würde ein Träger genügen; zur Erhöhung der Genauigkeit sendet man jedoch die Information über mehrere Träger. Es lassen sich somit - je nach Empfängertyp - physikalische Effekte herausrechnen, die die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Atmosphäre beeinflussen [Tha].

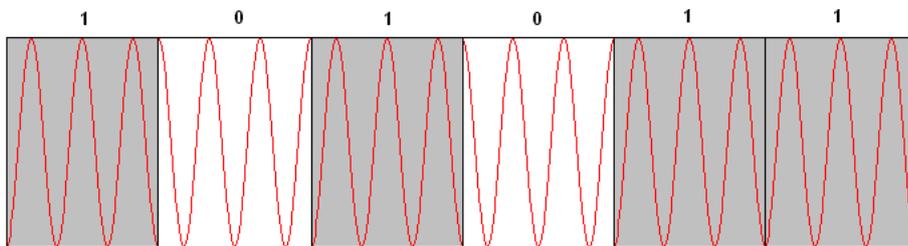


Abbildung 2: Bei BPSK wird die Phase einer Trägerschwingung je nach Bit (0 oder 1) geändert.

<i>L1</i> -Frequenz	1575,42 MHz	von herkömmlichen Empfängern benutzt
<i>L2</i> -Frequenz	1227,60 MHz	zusätzlich bei besseren Empfängern
<i>L5</i> -Frequenz	1176,45 MHz	in Planung

Tabelle 1: GPS-Trägerfrequenzen

Alle Satelliten senden über die gleichen Trägerfrequenzen. Sie verwenden jeweils ihre eigene codierte Signalfolge, damit sich die Sender nicht gegenseitig stören. Zum Trennen der Signale beim Empfänger und zur Identifizierung des Satelliten wird das Signalgemisch mit den bekannten Codes dekodiert (Code-Multiplexverfahren (CDMA)).

Die codierte Übertragung soll außerdem sicherstellen, dass nur Empfänger die Satellitendaten verarbeiten können, die den Code kennen. Hierfür gibt es einen öffentlichen und einen nicht-öffentlichen Code. Der öffentliche Code ist jedem GPS-Empfänger bekannt und ist für die zivile Nutzung unter dem Namen **Standard Positioning Service (SPS)** vorgesehen. Er wird nur über die L1-Frequenz übertragen und nennt sich **C/A-Code** („**C**oarse/**A**cquisition“). Orthogonal hierzu wird die gleiche Satelliteninformation mit dem **P/Y-Code** („**P**recision/**E**ncrypted“) übertragen. Der Code ist dem amerikanischen Militär bekannt.

Über die L2-Frequenz wird lediglich der P/Y-Code übertragen. Der P/Y-Code wird also über beide Frequenzen abgestrahlt. Somit ergibt sich für das Militär eine höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Die Daten mit der Information von 1500 Bits werden mit einer Geschwindigkeit von 50 bit/s übertragen. Zur Übertragung dieser periodisch sich wiederholenden Daten werden demnach  $\frac{1500 \text{ Bit}}{50 \text{ bit/s}} = 30 \text{ s}$  benötigt. Die Datensignale sind in fünf verschiedene Unterrahmen (Subframes)

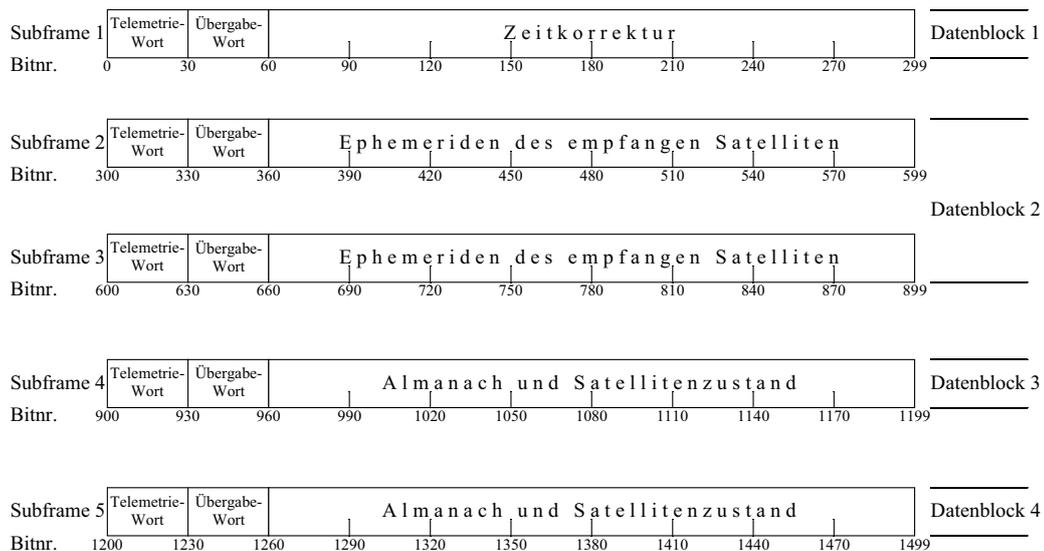


Abbildung 3: Unterrahmen der GPS-Information [Bau]

unterteilt, die wiederum in zehn Worte untergliedert sind. Jeder Unterrahmen beginnt mit einem Telemetriewort (TLM) und dem Übergabewort (HOW) (vgl. hierzu Abbildung 3).

Das Telemetriewort dient der Information der Nutzer des Systems; es enthält ein Synchronisationsmuster, durch das der Zugang zu den Navigationsmitteilungen erleichtert wird. Es besteht aus einer bekannten Bitfolge, Telemetriedaten und Prüf-Bits und dient dem Empfänger zur Syn-

chronisation mit dem Satelliten. Der 1. Unterrahmen enthält Zeitkorrekturwerte, der 2. und 3. Parameter der Ephemeriden (Bahndaten), der 4. und 5. Almanachdaten, die Informationen über die Bahnparameter aller Satelliten und deren technischen Zustand geben.

Das Übergabewort wird zur Verknüpfung des C/A-Codes mit dem P/Y-Code für die Nutzer (Militär) benötigt [Man].

Die über die beiden vorhandenen Trägerfrequenzen übertragene Information ist die gleiche, nur unterschiedlich codiert.

Für eine bandbreitengespreizte Datenübertragung (Spread Spectrum) mit mehreren Sendern auf einer Frequenz (CDMA) ist die Codierung zusätzlich erforderlich. Die Codierung löst daher mehrere Probleme gleichzeitig. Mit der Erhöhung der Bandbreite (Spreizung) wird die Sendenergie auf einen größeren Frequenzbereich aufgeteilt als erforderlich. Dies wird in Abbildung 4 deutlich. Hier sind zwei gleiche Signalenergien abgebildet. Die x-Achse bildet die Frequenz ab, die y-Achse die Leistung. Dabei ist zu sehen, dass das untere Signal eine größere Bandbreite in Anspruch nimmt als das darüber abgebildete. Hierdurch wird eine höhere Übertragungssicher-

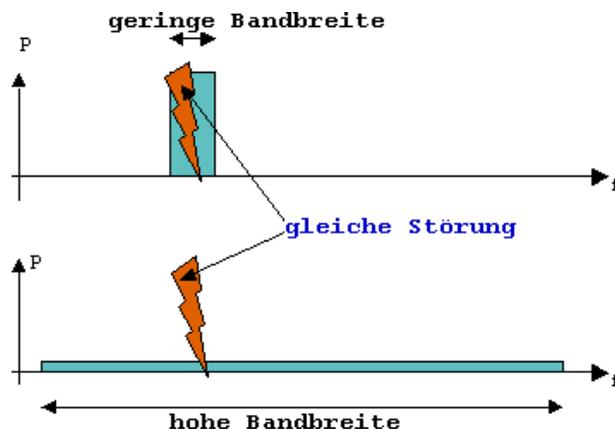


Abbildung 4: Störung eines ungespreizten und gespreizten Spektrums

heit erreicht, da sich Störungen einzelner Frequenzen bei einer hohen Bandbreite im Gegensatz zu einer geringen Bandbreite prozentual nicht so stark bemerkbar machen.

Da für den Empfang von GPS-Daten Korrelationsempfänger genutzt werden, ist die Kenntnis eines Referenzcodes Voraussetzung. Korrelationsempfänger vergleichen das Empfangssignal (von welchem die Datenstruktur bekannt ist) mit einem Referenzsignal. Korrelationsempfänger ermöglichen es, dass sogar stark verrauschte Signale empfangen werden. Daher ist der Empfang

ist schwer (absichtlich oder unabsichtlich) zu stören [Rab].

Um auf der gleichen Frequenz senden zu können (CDMA), hat jeder Satellit seinen eigenen Code, mit dem man die Herkunft des Signals zuordnen kann. Der C/A-Code hat 1023 Bits und ist eine pseudozufällige (pseudo random noise) Codefolge. Diese 1023 Bits (genauer: Chips<sup>1</sup>) lange Folge hat eine Periodendauer von 1 ms. Sie ist also höherfrequent als die Nutzdaten mit einer Periodendauer von 30 s. Der Code ist pseudozufällig, weil seine Folge sich nach den gesendeten 1023 Bits wiederholt.

Übertragen wird die codierte Nutzinformation, welche den hochfrequenten Träger moduliert.

### 3.1.2 Sendung und Ausbreitung

Das nach der Modulation des Trägers mit der Information und der Codes entstandene Spread Spectrum Signal wird über die Antennen des Satelliten abgestrahlt. Es sind zirkularpolarisierte Wellen mit der geringen Sendeleistung von ca. 20-50 Watt, welche beim Empfänger mit geeigneten Antennen wieder empfangen werden müssen.

Eine zirkularpolarisierte Welle wird von einem elektrischen Feldvektor beschrieben, der an jedem Punkt im Raum als Funktion der Zeit einen Kreis darstellt. Der Vorteil ist eine geringe Schwankung in der Signalamplitude. Schwankungen in der Signalamplitude werden durch andere physikalische Effekte, durch die Ionosphäre oder die Beugung an Häusern hervorgerufen. Sie können, soweit vorhersagbar, mit hochwertigen Empfangsgeräten herausgerechnet werden.

In den Satelliten werden Antennen mit hoher Richtwirkung eingesetzt. Durch die Richtwirkung haben die Antennen einen hohen Gewinn an Sendeleistung, da sie gezielt in die Richtung senden können wo sie empfangen werden sollen.

Im Vakuum breiten sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit aus. Diese beträgt  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Die hohe Genauigkeit ist notwendig, da die Lichtgeschwindigkeit in die Berechnung der Signallaufzeit einfließt. Im Nichtvakuum hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  von der Brechzahl  $n$  des Mediums ab. Es besteht folgende Beziehung:  $n = \frac{c}{v}$ . Der Zahlenwert der Brechzahl liegt nahe bei 1.

Ein Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz der betreffenden Welle abhängt, wird als dispersives Medium bezeichnet. Für Frequenzen oberhalb von 1000 MHz ist

---

<sup>1</sup>Ein Chip enthält keine Nutzinformation.

die Ionosphäre ein solches dispersives Medium, die Troposphäre jedoch nicht. Die Brechzahl ist in einem dispersiven Medium von der Frequenz abhängig. Die konkrete Form der Dispersion hängt von der Art der Welle und vom Medium ab, das heißt, es besteht eine Wechselwirkung zwischen Welle und Medium [Man].

Da die Brechzahl und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzabhängig ist, ist die Gruppenlaufzeit nicht linear. Unter der Gruppenlaufzeit wird die Geschwindigkeit eines Frequenzbandes bei der Übertragung über ein Medium verstanden. Sie setzt sich aus den verschiedenen Phasengeschwindigkeiten der Frequenzen zusammen, welche frequenzabhängig sind.  $\tau_{Gr}(f) = \frac{d\phi(f)}{df}$  stellt den Zusammenhang zwischen Gruppenlaufzeit und Frequenz dar.

Diese Nichtlinearität kann zu Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung führen. Sie lassen sich jedoch experimentell oder rechnerisch ermitteln und herausrechnen.

Weitere physikalische Effekte sind Mehrwegeausbreitung oder Beugung. Eine Mehrwegeausbreitung entsteht, wenn ein Signal an einer großen Fläche (z. B. Häuserwand) reflektiert wird und danach bei dem Empfänger ankommt, bei welchem zuvor das selbe unreflektierte Signal angekommen ist. Dieses Phänomen tritt zwar innerhalb von Bruchteilen von Sekunden auf, kann aber eine Falschpositionierung um einige Meter zur Folge haben. Signalbeugungen entstehen oft an Häuserkanten. Hier wird das Signal abgelenkt. Bei der Beugung entstehen neue Frequenzen.

Um möglichst schnell ein präzises Ergebnis präsentieren zu können erfordern diese genannten Phänomene ausgereifte Empfänger.

### 3.2 GPS-Antennen und GPS-Empfänger

Für den Empfang und die Verarbeitung der Satellitendaten werden eine Antenne und ein Empfänger benötigt. Der Empfänger ist ein digitalverarbeitendes System an dessen Ausgang die Daten für die Weiterverarbeitung im Navigationssystem zur Verfügung gestellt werden. Eingang des Empfängers ist das analoge Signal der Empfangsantenne.

Die vom Satelliten ausgesendeten Wellen sind zirkularpolarisiert. Für den Empfang dieser Wellen sind idealerweise auch zirkularpolarisierte Antennen notwendig. Während GPS-Signale rechtsdrehend zirkular polarisiert (right hand circular polarisation - RHCP) ausgesendet werden, sind Mehrwegeausbreitungen durch Reflexion umgekehrt linksdrehend zirkular polarisiert (left hand circular polarisation - LHCP). Idealerweise werden also Empfangsantennen benutzt, die rechts-

drehend zirkular polarisierte Signale empfangen und reflektierte Signale mit längerer Laufzeit dämpfen.

Um aus einem verrauschten Signal die benötigten Informationen zurückzugewinnen, wird oft ein Kalman-Filter benutzt, welches sich an aktuell vorliegende Bedingungen anpassen kann. Ein Kalman-Filter basiert auf einem Algorithmus mit dem sich Zufallssignale durch Schätzung weiterverarbeiten lassen. Durch diese Schätzung wird auch eine Signalverarbeitung von stark verrauschten Signalen möglich gemacht. Für weiterführende Literatur zur Kalman-Filterung wird auf [Wen] S.129 ff. verwiesen.

### 3.2.1 Dekodierung der Satellitennachricht

Die mit der GPS-Antenne von mehreren Satelliten eingefangenen Signale müssen in dem GPS-Empfänger so aufbereitet werden, dass sie per PC weiterverarbeitet werden können. Die GPS-Information soll anschließend in einem vom Computer lesbaren Format vorliegen. Hierbei gilt es, aus den verschiedenen Messungen die Position zu bestimmen und redundante Informationen zurückzuhalten.

Bevor das Signal eines Satelliten ausgewertet und verarbeitet werden kann, muss der Empfänger den Anfang einer Datensequenz finden, welche die in Kapitel 3.1 gezeigten Strukturen hat.

Nachdem eine Datensequenz gefunden wurde, werden zunächst die empfangenen Almanach-Daten verarbeitet, sofern diese vorhanden sind. Aus den Almanach-Daten eines Satelliten lassen sich die ungefähren Positionen der anderen Satelliten bestimmen. So kann von dem Empfänger auf mögliche empfangbare Satelliten geschlossen werden. Satelliten die sich hinter dem Horizont befinden, werden dann nicht mehr gesucht, was die Startphase beschleunigt. Nach der Startphase werden die Ephemeriden-Signale ausgewertet. Dies erfolgt durch die in Kapitel 3.1 erwähnte Korrelation mit dem bekannten C/A-Code.

## 3.3 Berechnung der Position

Hat der Empfänger je ein Frame von mindestens drei Satelliten empfangen (dieses dauert je nach Empfänger zwischen 30 und 100 Sekunden), so kann die eigene Position berechnet werden. Die genaue Positionsbestimmung basiert auf der Laufzeit des Signals vom Satellit zum GPS-Empfänger. Zur Berechnung der zurückgelegten Strecke eines ausgesendeten Signals ist es

erforderlich, dass die Atomuhr des Satelliten mit der Uhr des Empfängers synchron läuft. Mit einem vierten Satelliten wird die erforderliche Genauigkeit erreicht, indem die Zeit relativiert wird. Eine zurückgelegte Strecke bei konstanter Geschwindigkeit berechnet sich mit der Formel:

$$\Delta s = \Delta t \cdot v, \quad (1)$$

mit  $\Delta s$  als zurückgelegter Strecke,  $\Delta t$  als Zeitdifferenz,  $v = \text{const}$  als Geschwindigkeit.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale ist nahezu gleich, da sie die gleichen Atmosphärenschichten durchqueren. Daher kann vereinfacht mit der Lichtgeschwindigkeit gerechnet werden. Somit ist die Entfernung nahezu proportional zu der Signallaufzeit.

Für die Berechnung der Entfernung zu den einzelnen Satelliten wird folgende Formel benutzt:

$$r = \Delta t \cdot c = (T_E - T_S) \cdot c, \quad (2)$$

mit  $r$  als Entfernung zum Satelliten,  $\Delta t$  als Signallaufzeit,  $T_E$  als Empfangszeitpunkt,  $T_S$  als Sendezeitpunkt und  $c$  als Lichtgeschwindigkeit. Die Formel ist ideal und berücksichtigt keinerlei Unsicherheiten in der Signallaufzeit, die z. B. durch die Ionosphäre entstehen.

Mit der bekannten Entfernung zu drei Satelliten ist eine dreidimensionale Positionsbestimmung (Trilateration: Entfernungsmessung von drei Punkten aus) möglich.

Die dreidimensionale Position eines Satelliten mit dem Index  $i$ , wird mit den Koordinaten  $U_i, V_i$  und  $W_i$  angegeben. Die Koordinaten des Empfängers werden mit folgender Formel berechnet:

$$r_i = \sqrt{(U_i - X)^2 + (V_i - Y)^2 + (W_i - Z)^2}, \quad (3)$$

wobei  $r_i$  die Entfernung zum  $i$ -ten Satelliten bezeichnet.

Diese Formel enthält die drei Unbekannten  $X, Y, Z$ , welche die Koordinaten des GPS-Empfängers sind. Demnach sind zur Lösung des Gleichungssystems mindestens Informationen von drei Satelliten notwendig. Sollten mehrere Satelliten empfangbar sein, werden diese von den modernen Empfängern zusätzlich ausgewertet, um den Fehler der Positionsermittlung so gering wie möglich zu halten. Inwiefern weitere Satelliten in die Positionsbestimmung mit einfließen, ist von Empfänger zu Empfänger unterschiedlich und herstellerspezifisch.

### 3.4 Messgenauigkeit

Verschiedene Einflüsse aus der Umgebung beeinflussen die Genauigkeit der Positionsbestimmung mittels GPS. Diese lassen sich teilweise ziemlich genau vorhersagen, so dass oft nur ein kleiner Restfehler bleibt. Die Messfehler lassen sich je nach Fehlerquelle in zwei Gruppen unterteilen, die *common-mode*-Fehler und die *non-common-mode*-Fehler.

Common-mode-Fehler sind Messfehler die systematisch bei allen Empfängern (teilweise regional und temporär begrenzt) in gleicher Ausprägung auftreten. Hierzu zählen Ionosphärenfehler, Troposphärenfehler, Ephemeridenfehler und Satellitenuhrenfehler. Alle Fehler treten grundsätzlich auf und sind zum Teil wetterabhängig. Für Ungenauigkeiten sind Eigenschaften und Position jedes einzelnen Satelliten verantwortlich. Der Nutzer kann den common-mode-Fehler nicht beeinflussen.

Non-common-mode-Fehler treten nur positionsbedingt und für den einzelnen Empfänger individuell auf. Hierzu zählen die Mehrwegeausbreitung, Empfängeruhrenfehler, Empfängerrauschen, Beugung. Für Ungenauigkeiten sind Eigenschaften und Position des Empfängers verantwortlich.

Die Ungenauigkeiten, die durch die Messfehler entstehen, können durch Referenzmessungen an Standorten mit bekannter Position verringert werden, wie dies beim *Differential GPS* (siehe Kapitel 3.7) gemacht wird.

### 3.5 Koordinatensysteme

Ein GPS-Empfänger kann sein Ergebnis der Positionsmessung in verschiedenen Koordinatensystemen ausgeben, Längen-/Breitengrade, nationale Koordinatensysteme, global gültige Systeme, usw. Es ist jeweils das geodätische Datum zu wählen, welches zu der benutzten Karte passt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden universelle nordbezogene Koordinaten in Bezug auf das WGS-84 benutzt. Die Umrechnung zu nordbezogenen Koordinaten ist an das universelle transversale Mercatorformat (s. u.) angelehnt.

#### 3.5.1 Koordinatensysteme der Erde

Das bekannteste Koordinatensystem auf der Erde ist die Einteilung der Erde als Kugelkörper in geographische Breiten- und Längengrade. Der Äquator hat den Breitengrad 0. Die Koordinaten

auf der Nordhalbkugel sind nördlicher Breite (bis  $90^\circ$  am Nordpol), die Koordinaten auf der Südhalbkugel sind südlicher Breite (bis  $90^\circ$  am Südpol).

Zusätzlich zu den Breitengraden gibt es die Längengrade. Der „Nullmeridian“ befindet sich in Greenwich bei London, westlich und östlich hiervon erstrecken sich bis  $180^\circ$  östlicher oder westlicher Länge die Längengrade. Der  $180^\circ$  Längengrad ist, wie der Nullmeridian, nur einmal vorhanden.

Eine feinere Auflösung zwischen den ganzzahligen Breiten- und Längengraden kann in Minuten ( $60 \text{ min} = 1^\circ$ ), Sekunden ( $60 \text{ sek} = 1 \text{ min}$ ) oder auch dezimal vorgenommen werden.

Da der Erdkörper jedoch keine ideale Kugel ist, ist die geographische Breiten- und Längeneinteilung nicht korrekt genug. Wird als Erdmodell ein Rotationsellipsoid verwendet, sind korrektere Einteilungen möglich.

Durch die Verjüngung der Abstände der Längengrade in Richtung der Pole sind dort für eine genauere Positionsangabe weniger Stellen notwendig. Das heißt, dass zum Beispiel eine Angabe von Grad und Minute an der Antarktis eine recht präzise Angabe ist, während für einen Punkt am Äquator Grad, Minute und Sekunde erforderlich wären. Diese Nichtlinearität soll mit Hilfe der Umwandlung in Karten (kartesisches Koordinatensystem) vermieden werden.

Für das Koordinatensystem auf der Erde ist zusätzlich eine dritte Achse notwendig, die Höhenachse. Ohne diese würde das GPS-System für die Luftnavigation nicht tauglich sein. Außerdem können somit Höhenunterschiede der Erdoberfläche berücksichtigt werden. Näheres hierzu findet sich in [Bau].

Ein Koordinatensystem ist idealerweise ortsfest, das heißt der Koordinatenursprung befindet sich in Ruhelage und die Richtungen der Koordinatenachsen sind raumfest. Dieses Koordinatensystem nennt sich Inertialsystem. Betrachtet man lediglich die Erde alleine als Körper im Koordinatensystem, so lässt sich hierfür ein erdbezogenes (terrestrisches) Inertialsystem entwickeln. Da jedoch für die Satellitennavigation Bezüge zu Positionen im Weltraum gemacht werden müssen, ist die Entwicklung eines Koordinatensystems schwierig. Es müssen unter Umständen hierbei auch die Bewegung des Mondes um die Erde und die Bewegung der Erde um die Sonne mit einbezogen werden.

Die Satelliten haben keinen festen Bezugspunkt zur Erde, vielmehr bewegen sie sich um diese. Deshalb sind terrestrische Koordinaten für die Positionsbeschreibung des Satelliten von der Erde

aus nicht geeignet. Zu einem terrestrischen Koordinatensystem der Erde ist demnach auch ein astronomisches Koordinatensystem für die Positionsbestimmung der Satelliten erforderlich. Um Bezug zwischen diesen herzustellen (da dieses für die Berechnung der eigenen Position erforderlich ist) wurden geeignete Koordinatentransformationen geschaffen, die möglichst alle Punkte berücksichtigen. Die Transformationen werden von den Empfängern automatisch vorgenommen.

### 3.5.2 Vermessung

Ein Großteil der deutschen Landesvermessungen verwendet das Bessel-Ellipsoid mit dem Gauß-Krüger-Koordinatensystem als Abbildungsvorschrift zur Berechnung von ebenen metrischen Koordinaten, welche  $3^\circ$  breite Streifensysteme verwenden. Das Gauß-Krüger-Koordinatensystem nutzt eine konforme Abbildung der Erdkrümmung (bzw. im weitesten Sinne eines Kegels) um diese auf eine Zylinderfläche verzerrungsfrei abzubilden. Somit können Erdkoordinaten in Meter angegeben werden. Anschaulich ist dies in Abbildung 5 dargestellt. Der Vorteil von metrischen Koordinaten ist die einfachere Weiterverarbeitung der Werte.

### 3.5.3 World Geodetic System 1984 (WGS-84)

Für das GPS ist ein Koordinatensystem entwickelt worden, welches World Geodetic System 1984 (WGS-84) genannt wird und ein einheitliches Koordinatensystem für die gesamte Erde darstellt. Die Form der Erde stimmt bei diesem System mit einem Ellipsoid überein. WGS-84 stellt sowohl das Geodätische Datum, das Fundamentalsystem und das Referenzellipsoid zur Verfügung. Die Koordinaten können hiermit bis auf 5 cm angepasst werden.

### 3.5.4 Mercatorformat

Für die Nutzung von Karten in einer Ebene ist ein kartesisches Koordinatensystem mit Längeneinheiten notwendig.

Hierbei wird das UTM-System (Universal Transverse Mercator) benutzt, welches die Erde in vertikale Streifen von  $6^\circ$  aufteilt. Diese Streifen sind von  $180^\circ$ - $174^\circ$  w.L. bis  $174^\circ$ - $180^\circ$  ö.L. in insgesamt 60 Streifen angeordnet. Der jeweilige mittlere Längengrad eines Streifens ist der Referenzpunkt für die Karten, die in dem benannten Streifen liegen. Er hat die Größe 500000 m (500 km). Da die Streifen an jedem Ort kleiner als 1000 km sind, kann man im Bereich von 0 m bis

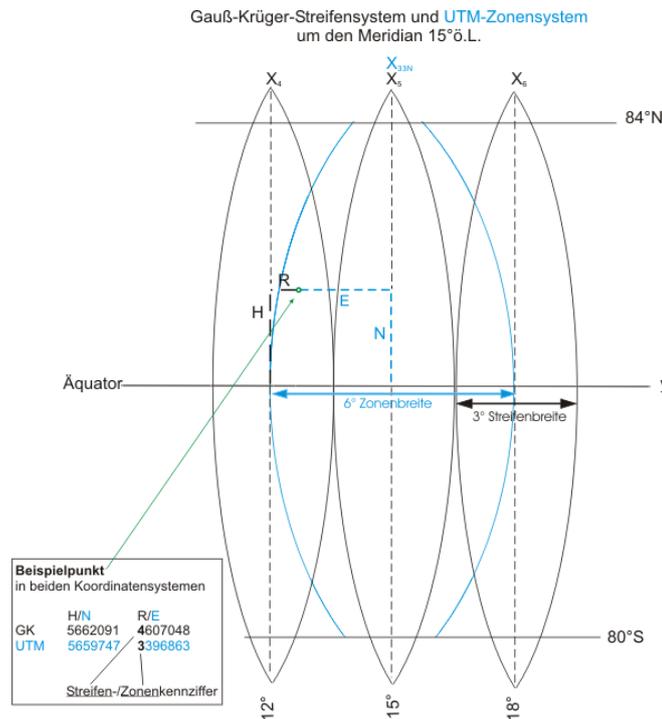


Abbildung 5: Kartesische Koordinatensysteme (Quelle: Landesvermessungsamt Sachsen)

999999 m den Rechtswert angeben. Durch diese, als false easting bezeichnete Verschiebung des Ursprungs, werden negative Längenangaben vermieden. Längenangaben in Ost-/ Westrichtung werden Rechtswerte genannt. Die Einheit ist immer Meter.

Für die Angabe des Breitengrades eines Punktes wird der Abstand zum Äquator angegeben. Diese, auch als Hochwert oder northing bezeichnete Größe, ist die 7-stellige Längenangabe in Nord-/Südrichtung.

### 3.6 Datenformate

Die US-amerikanische *National Marine Electronics Association* (NMEA) hat 1983 die erste Version des *Standard for Interfacing Marine Electronic Devices* NMEA-0183 veröffentlicht, worin Anforderungen an das Übertragungssignal, das Datenübertragungsprotokoll und Datensätze für den Informationsaustausch zwischen Instrumenten für maritime Anwendungen definiert werden. Die aktuelle Version 3.01 stammt vom Januar 2002. NMEA-0183 hat weit über den maritimen Bereich hinaus Verbreitung gefunden. Viele GPS-Empfänger sind fähig, Positionsergebnisse entsprechend dieses Standards über ihre serielle Schnittstelle auszugeben. Die Daten werden

bei NMEA-0183 im ASCII-Format mit der Übertragungsgeschwindigkeit von 4800 bps<sup>2</sup> zur Verfügung gestellt. Somit ist die Weiterverarbeitung mit einem Computer recht einfach.

Jeder NMEA-Datensatz beginnt mit einem \$-Zeichen und endet mit einem Zeilenvorschub (*carriage return* und *line feed*). „Während die Buchstabengruppe zu Beginn zugleich Absender (GP für GPS-Empfänger) und Datentyp (z. B. GSV = satellites in view) kennzeichnet, folgen die mit Komma getrennten Daten in genau festgelegter Form“ [Gor].

Die Bedeutung einiger NMEA-Datensätze:

\$GPRMC	recommendet minimum navigation information
\$GPGLL	geographic position latitude longitude
\$GPGSV	satellites in view
\$GPRTE	routes
\$GPALM	almanac data

Im Folgenden ist beispielhaft eine \$GPRMC-Zeile dargestellt wie sie dem Navigationsgerät zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt wird:

```
$GPRMC,234911,A,5333.6947,N,01000.9785,E,0.85,123.49,031207,,*00
```

Sie gibt Auskunft über Uhrzeit, Gültigkeit der Daten, Position, Geschwindigkeit, Kurs, Höhe und Datum. Demnach ist es bei dem Beispiel 23:49:11 Uhr (UTC-Zeit), die Daten sind aktuell, die Position ist 53°33,6947' Nord und 10°00,9785' Ost, Geschwindigkeit: 0,85 Knoten, Höhe: 123,49 m und Datum: 03.12.2007.

NMEA-0183 hat sich zu einem Universalformat zwischen GPS-Empfänger und weiterverarbeitender Software (zur Navigation) entwickelt. Ein neuer Standard (NMEA-2000) befindet sich momentan im Praxistest. Er wird die Vernetzung der zunehmenden Anzahl elektronischer Geräte an Bord von Schiffen ermöglichen [Bau].

### 3.7 Differential GPS

Um eine größere Genauigkeit bei der Positionsbestimmung zu erreichen, können Verfahrensmöglichkeiten im Zusammenhang mit GPS in Betracht gezogen werden. Durch das Differential Global

<sup>2</sup>Bit pro Sekunde.

Positioning System (DGPS) wurde ein Verfahren geschaffen, welches Koordinatenabweichungen korrigiert und die Genauigkeit verbessert. Dieses ist realisiert durch einen zusätzlichen terrestrischen<sup>3</sup> Empfänger und einen zusätzlichen ortsfesten Sender, dem seine Koordinaten bekannt sind.

Die ortsfeste Station empfängt die Signale der GPS Satelliten, berechnet die Abweichung zur eigenen, festen Position und übermittelt diese Abweichung per Funk ca. alle 3 Sekunden (je nach Verfahren) an alle DGPS Empfänger, die in der Reichweite sind. Diese dekodieren sowohl ihre eigenen GPS Signale als auch die Abweichung der Bodenstation und korrigieren hiermit ihre Position. Es können dadurch Genauigkeiten von wenigen Millimetern, die z. B. in der Landvermessung erforderlich sind, erreicht werden. Je dichter der Empfänger an der Bodenstation ist, um so genauer sind die Korrekturen.

Hierbei lassen sich jedoch nur die common-mode-Fehler eliminieren, da diese sowohl an dem eigenen GPS-Empfänger als auch am GPS-Empfänger der Referenzstation auftreten. Sollte ein Empfänger zum Beispiel durch Mehrwegeausbreitung eine ungenaue Position errechnen, so wird diese durch DGPS nicht verbessert.

Für die Funkverbindungen des DGPS-Korrektursignals sind mehrere Möglichkeiten und Verfahren denkbar und werden auch umgesetzt. Beispielsweise werden Korrektursignale über den Mobilfunk oder über den Langwellensender ausgesendet, der auch Funkuhren und Funkwecker steuert. Einige Rundfunksender senden auch Korrektursignale in der *Radio Data System* (RDS)-Information mit. Für DGPS liegt also kein Standard vor. Jede Institution, die von DGPS Gebrauch macht, hat ihre eigenen Bodensender geschaffen. Dieser DGPS-Dienst wird teilweise kostenpflichtig anderen Nutzern zur Verfügung gestellt. Als weitere Möglichkeit werden DGPS-Daten im Internet zur Verfügung gestellt.

Als Beispiel für einen DGPS-Dienst wird im Folgenden SAPOS kurz vorgestellt.

### 3.7.1 Satellitenpositionierungsdienst

Der **Satellitenpositionierungsdienst** SAPOS ist eine deutsche Entwicklung der Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und der Firma E.ON Ruhrgas.

SAPOS wird Anwendern in den verschiedenen Genauigkeitsstufen zur Verfügung gestellt, die in

---

<sup>3</sup>nicht über Satellit.

Tabelle 2 zu sehen sind.

Abkürzung	Bezeichnung	Genauigkeit
EPS	Echtzeit Positionierungs-Service	1-3 m
HEPS	Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service	1-3 cm
GPPS	Geodätischer Präziser Positionierungs-Service	1 cm
GHPS	Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service	<1 cm

Tabelle 2: SAPOS-Dienste

Die Grundlage dieser Dienste bildet ein Netz von permanent betriebenen GPS-Referenzstationen. Sie senden ihre Korrekturdaten im 2m-Band aus. Das Format der Korrekturdaten ist das Europäische Terrestrische Referenzsystem ETRS-89. Dies ist ein spezielles für Europa gültiges dreidimensionales Bezugssystem und ähnelt dem WGS-84. Für Europa hat das ETRS jedoch eine etwas höhere Genauigkeit, welche z. B. beim Vermessungswesen im Millimeterbereich erforderlich ist.

### 3.7.2 Bedeutung für die Yachtnavigation

Für die Navigation im Yachthafen wäre die exakte Positionsbestimmung mit Zuhilfenahme von DGPS ein denkbarer Ansatz, denn eine Abweichung von mehreren Metern (ohne GPS) in der Position ist nicht brauchbar. Der Aufwand für den Betrieb eines DGPS-Systems ist jedoch sehr hoch und eine Genauigkeit im Millimeterbereich nicht zwingend erforderlich.

Da es notwendig ist, eine Position zu korrigieren, wird vorerst von einer anderen Möglichkeit Gebrauch gemacht, die die gemessene Position korrigiert. Diese soll im Folgenden vorgestellt werden. In der Praxis wird sich zeigen, ob auf DGPS verzichtet werden kann, wovon vorerst ausgegangen wird.

## 4 Geographische Gegebenheiten

Eine Yacht befindet sich im Hafenbecken mit dem Ziel, eine Anlegestelle anzufahren. Als Beispiel wird sich im Folgenden die Hafenkarte in Abbildung 1 betrachtet. Die vom GPS ermittelte Position der Yacht wird in einen Laptop eingelesen. Auf diesem wird der Hafenplan dargestellt und die vom GPS ermittelte Position wird in den Plan eingeblendet.

Es ist davon auszugehen, dass die vom GPS ermittelte Position nicht exakt ist. Deshalb sichtet der Bediener (Steuermann) die wirkliche Position anhand von Schifffahrtszeichen und örtlichen Gegebenheiten und gibt diese per Cursor in den Hafenplan ein, so dass eine Korrektur der GPS-Positionsangabe erfolgt. Dieser Korrekturwert ist ein Vektor. Für eine kurze Zeit ersetzt diese Eingabe die Daten einer Referenzstation. Für die Positionskorrektur während der Fahrt werden alle folgenden GPS-Positionen mit diesem Vektor addiert. Dieses Verfahren ist eine Alternative zu dem im Kapitel 3.7 erläuterten DGPS-Verfahren und dient zur Kalibrierung des Messsystems. Die Referenzierung „per Hand“ hat Vor- und Nachteile welche im Kapitel 4.1 angesprochen werden.

Gemäß Karte der Aufgabenstellung (Abbildung 1) liegt die von GPS ermittelte Position der Yacht bei  $54^{\circ}11'04''$  nördlicher Breite und  $12^{\circ}06'05''$  östlicher Länge. Die vom Bediener gesichtete Position liegt bei  $54^{\circ}10'99''$  nördlicher Breite und  $12^{\circ}06'02''$  östlicher Länge. Dies bedeutet eine Differenz von ca. 100 Metern, welche durchaus eine realistische Abweichung des GPS darstellt.

### 4.1 Navigationsproblematik

Das oben genannte Beispiel macht deutlich, dass zusätzlich zum GPS für die Genauigkeit eine weitere Positionsbestimmung von großer Wichtigkeit ist. Im Beispiel liegt sogar eine Mole zwischen den beiden ermittelten Positionen. Die Ortsbestimmung durch den Bediener kann im Hafen eine Bestimmung durch DGPS ersetzen. Die Genauigkeit ist somit vom Bediener abhängig. Es wird davon ausgegangen, dass seine Eingaben für die Navigation im Hafen ausreichend genug sind. Nach der Referenzierung (Kalibrierung) ist für die Navigation nur noch eine relative Position notwendig, da das Ziel auch relativ eingetragen wird.

Voraussetzung für das optimale Manövrieren mit GPS ist, dass sich die für den Empfänger verfügbaren Satelliten nicht ändern. Findet ein Satellitenwechsel statt, kann unter Umständen die neu errechnete Position von der alten Position um einige Meter abweichen.

Ideal wäre es, wenn man den GPS-Empfänger zwingt, für die Positionsbestimmung nur diejenigen Satelliten zu nutzen, die in der Zeit des Manövriervorgangs nicht hinter dem Horizont verschwinden und die somit immer für eine genaue relative Position sorgen. Da die Daten der Umlaufbahn eines Satelliten bekannt sind, ließen sich die Satelliten rechnerisch bestimmen.

Dies ist mit den im Rahmen der Diplomarbeit zur Verfügung stehenden Standard-Empfängern allerdings nur möglich, indem man bestimmte Satellitenpositionen nicht in die Berechnung mit einbeziehen lässt. Das soll vorerst nicht berücksichtigt werden, sollte aber je nach Erfahrung in der Praxis in Erwägung gezogen werden. Es ist möglich, eine Warnung auszugeben, die eine „Neureferenzierung“ empfiehlt, wenn ein Satellitenwechsel stattgefunden hat oder eine gewisse Zeitdauer nach der Referenzierung überschritten worden ist.

Ein großer Vorteil der Positionsbestimmung und Kalibrierung durch den Bediener besteht darin, dass die drei non-common-mode-Fehler, die bei der Nutzung von DGPS entstehen können, weitestgehend keine Rolle mehr spielen, weil alle Messungen mit denselben Geräten stattfinden und somit davon auszugehen ist, dass ein Messfehler bei der Referenzmessung auch bei allen folgenden Messungen vorhanden ist. Demnach wird die gesamte Genauigkeit allein durch die Genauigkeit der Positionsreferenzierung bestimmt, sofern sich die Satellitenkonfiguration nicht ändert.

## 4.2 Daten und Position der Yacht

Die genaue Position und Orientierung einer Yacht lässt sich leicht anschaulich mit zwei unabhängigen Größen beschreiben. Ausreichend für die Beschreibung wäre die Positionsangabe des Mittelpunktes der Yacht sowie der Kurs (Himmelsrichtung). Eine andere Lagebeschreibung wäre durch die Position von zwei Fixpunkten möglich. Beide Beschreibungsmöglichkeiten lassen sich ineinander umrechnen. Die Länge der durch die beiden Fixpunkte beschriebenen Gerade ist die Länge der Yacht, wenn sich die Punkte an Bug und Heck befinden.

Des Weiteren müssen die Ausmaße der Yacht bekannt sein. Dieses ist erforderlich um einen möglichen Spielraum in der Liegeposition zu errechnen. Der Freiraum zu anderen Yachten und Gegenständen sollte in entgegengesetzten Richtungen (an Bug und Heck) möglichst immer gleich groß sein, um Kollisionen durch Wellengang zu verhindern.

Die Orientierung der Yacht kann von *einem* GPS-Empfänger erst bei Bewegung der Yacht größer

als 3 Knoten ( $\approx 1,5m/s$ ) bestimmt werden [Sch]. Schwieriger ist es, die Orientierung der Yacht in Ruhelage zu bestimmen. Hierfür wird von einem zweiten GPS-Empfänger Gebrauch gemacht. Mit den Positionen der beiden GPS-Empfänger zueinander kann der Kurs ermittelt werden. Hierbei wird die Richtung im Koordinatensystem von dem einen Empfänger zum anderen bestimmt. Des Weiteren kann auch durch die beiden GPS-Empfänger die Entfernung zwischen diesen bestimmt werden. Da sich diese nicht ändert, kann die wirkliche Entfernung als Korrekturfaktor benutzt werden oder eine Abschätzung der Güte gemacht werden.

Die Breite der Yacht wird nicht berücksichtigt.

#### 4.2.1 Yachtposition

Die Parametrierung der Yachtposition wird zu Beginn des Programmablaufs vorgenommen, so dass zu Beginn eine vom Bediener gesichtete Position dem Assistenten bekannt ist, die anschließend mit dem GPS-System referenziert wird.

Die Festlegung der Position ist Grundlage für den gesamten Navigationsvorgang. Deshalb ist es wichtig, die Position der Yacht am Anfang genau zu bestimmen. Die im Programm verwendeten Daten für die Yachtposition sind immer Position des Mittelpunktes der Yacht (nordbezogene UTM-Koordinaten in der Maßeinheit Meter) sowie die „Sichtrichtung“ auf dem Kompass als Winkel zwischen  $0^\circ$  und  $359,9^\circ$ .

#### 4.2.2 Schiffmodell

Im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgen die Tests zur Erfassung des Navigationsverhaltens eines Schiffes mit einem Simulator. Um das Steuerverhalten eines Schiffes zu simulieren steht das mathematische Schiffmodell „SUSAN“ zur Verfügung. SUSAN steht für „Schiffsführungs- und Simulationsanlage“ und wurde am Institut für Schiffsbetrieb, Seeverkehr und Simulation (ISSUS) der HAW Hamburg entwickelt. Als Vorgabe für das Schiffmodell sind einige Parameter gefordert, wie Motorleistung, Tiefgang und Ausmaße. Diese sind für eine Yacht voreingestellt und haben die in Tabelle 3 zu sehenden Werte.

Das Schiffmodell berücksichtigt keine Windbewegungen sowie durch andere Einflüsse (andere Schiffe) verursachte Wellenbewegungen. Der Algorithmus von SUSAN wird in den Manövrierasistenten eingepflegt. In der Realität ist zu überprüfen, inwiefern das Verhalten eines Schiffes

---

Leistung	1000 kW
Tiefgang	2 m
Länge zwischen den Loten	15 m
Breite am Schwerpunkt	5 m
Maximalgeschwindigkeit	10 kn
Schwer-/Drehpunkt	50% von Achtern

Tabelle 3: voreingestellte SUSAN-Schiffsparameter

mit der Simulation übereinstimmt.

## 5 Zielbestimmung und Navigationssystem

Das Erreichen der Anlegestelle ist das Ziel dieser Diplomarbeit. Die Anlegestelle soll das Ziel der Yacht sein. Die Größe der Anlegestelle und die Größe der Yacht sind dabei von zentraler Bedeutung. Die Anlegestelle soll möglichst optimal angefahren werden. Da jede Yacht ein anderes Steuerverhalten hat, ist für jede Yacht eine eigene Routine notwendig. Durch den Einsatz des Assistenten sollen Wendemanöver und Rückwärtsfahrten vermieden werden, um dem Kapitän Rundumsicht zu ersparen. Ziel ist es, das Anlegemanöver schnell und fehlerfrei auch bei schlechter Sicht zu gestalten.

Die Parameter für die Anlegeroutine, mit der sich die Yacht steuern lassen, sind individuell für jede Yacht. Das Verhalten der Yacht in der Praxis muss vor dem Einsatz der Software zur Steuerung der Yacht messtechnisch erfasst werden, um anschließend geeignete Werte zu gewinnen, die das Schiff an die richtige Stelle leiten. Außerdem muss beachtet werden, dass das Schiff durch die Wellenbewegung des Wassers schwankt. Deshalb müssen Sicherheitsabstände eingeplant werden. Da der Assistent für beliebig große Yachten benutzt werden soll, ist an anderer Stelle zu gewährleisten, dass das Verhältnis von Yacht zu Anlegestelle passt, so dass die Yacht auch ohne Assistent anlegen kann.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die entwickelte Software an einem Modell getestet (siehe Kapitel 4.2.2), welches das Steuerverhalten einer Yacht simuliert. Es wird vorerst davon ausgegangen, dass sich keine Hindernisse auf der Route befinden, die das Schiff zurücklegen soll. Ziel soll es sein, die Anlegestelle möglichst genau zu erreichen.

### 5.1 Steuerungsvorschläge

Bei Navigationsgeräten für Autos entstehen bei Positionsabweichungen von 20m keine Probleme, da eine Aufforderung des Gerätes wie beispielsweise *'die nächste Straße bitte rechts'* zu fahren vollkommen genügt. Das Navigationsgerät des Autos korrigiert die Position immer auf die in der Karte nächstgelegene Straße. Bei der Navigation im Hafen stößt man hierbei auf Probleme. Der Vorschlag *'die nächste Straße bitte rechts'* würde alleine nicht genügen, da sich das Schiff im Wasser frei bewegen kann.

Zwischen dem Navigationssystem und der Bewegung des Schiffes muss demnach eine genauere Regelung stattfinden. Das Navigationssystem muss während der Navigationsdauer Steuereingrif-

fe vornehmen, um die Position zu erreichen. Unter Steuereingriffe werden Ruderausschlag und Motordrehzahl verstanden.

Es ist also notwendig, mit einem definierten Zeitraster, Messungen vorzunehmen und diese Werte mit der Soll-Position zu vergleichen. Messungen, die sich im Sekundentakt wiederholen, sind hierbei ausreichend und werden im Folgenden in Betracht gezogen.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass innerhalb einer Sekunde die zurückgelegte Strecke des Schiffes in dem Rahmen liegt, dass sie nicht gravierend von der vorher ausgeführten Bewegung abweicht. Zudem werden auch nur ca. einmal pro Sekunde aktualisierte Messdaten von den GPS-Empfängern zur Verfügung gestellt.

In der Praxis ist die Bewegung und der Kurs des Schiffes nicht alleine von Ruderstellung und Motordrehzahl abhängig. Die Wasserbewegung und Windgeschwindigkeit spielen eine große Rolle und müssen eventuell neben den GPS-Koordinaten in die fortwährende Berechnung der Steuereingriffe einfließen. Hierfür sind weitere Sensoren notwendig, die aber im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht weiter untersucht werden, da der Einsatz des Assistenten nur an einem Modell erprobt wird, bei dem die Messgrößen direkt aus diesem entnommen werden können und das Modell vorhersagbar ist.

### 5.1.1 Vergleich mit der Steuerung eines PKWs

Das Assistenzsystem kann mit den beiden Systemen verglichen werden, die sich an einem modern ausgestatteten Kraftfahrzeug vorfinden: Navigationsystem und Einparkhilfe. Zum einen soll das Assistenzsystem die Yacht in die richtige Richtung bewegen, zum anderen möglichst genau die Anlegestelle erreichen. Beim Kraftfahrzeug wird die Einparkhilfe nicht mit GPS sondern mit Ultraschallsensoren durchgeführt. Diese Sensoren messen lediglich die Entfernung zu anderen Objekten (Autos). Dies lässt sich in der Nautik mit einem Radar vergleichen, mit dem Abstände gemessen werden, ist jedoch für eine Navigation ungeeignet.

Das hier entwickelte Programm stellt als Abgrenzung zu schon ausgereiften Produkten eine Einparkhilfe per GPS für Schiffe dar, deren Grundlage nicht wie beim Auto die Abstandsmessung zu anderen Objekten ist.

## 5.2 Hardware und Software

Die Software des Manövrierassistenten soll auf einem Laptop ausgeführt werden. An ihm sind zwei GPS-Empfänger über serielle COM-Schnittstellen angeschlossen. Als Betriebssystem steht Windows zur Verfügung. Weitere Hardware als die beiden GPS-Empfänger und der Laptop ist nicht erforderlich.

### 5.2.1 GPS-Empfänger

Als GPS-Empfänger werden ein *Garmin GPS35-HVS* und ein *Navilock NL-302U* (siehe Abbildung 6) verwendet. Es handelt sich zwar um zwei verschiedene Geräte, die jedoch die Daten über eine serielle Schnittstelle im einheitlichen NMEA-Format liefern. Der Navilock-Empfänger ist durch einen internen USB-COM-Converter mit dem PC verbunden, der Garmin-Empfänger lässt sich direkt an die serielle Computer-Schnittstelle anschließen. Die Geräte verfügen beide

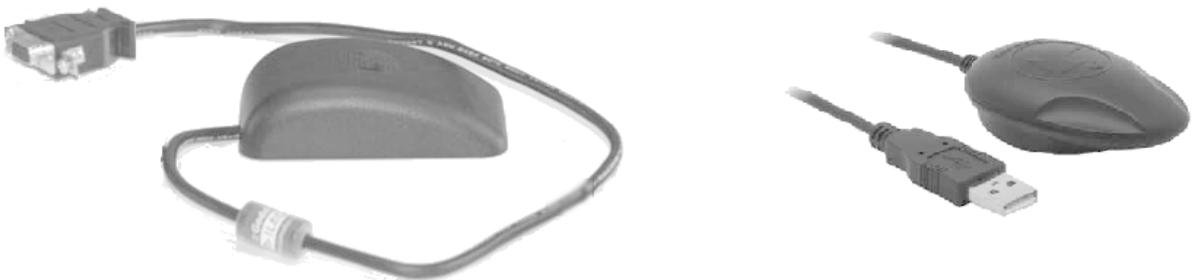


Abbildung 6: links: Garmin GPS35-HVS, rechts: Navilock NL-302U

über eine eingebaute Antenne.

Für eine genaue Erfassung der Lagerichtung der Yacht ist es sinnvoll, dass die GPS-Empfänger möglichst weit voneinander entfernt sind. Daher befinden sie sich im Optimalfall an Bug und Heck des Schiffes. Da der serielle Anschluss von GPS-Empfängern mit einer Datenrate von nur 4800 Bit pro Sekunde arbeitet, sind nach dem **RS-232**-Standard Verbindungen bis zu mehreren 100 Metern möglich. Somit können die Empfänger an der gewünschten Stelle installiert werden. Dies ist jedoch nur bei dem Empfänger von Garmin mit serielltem Anschluss möglich, da sich ein USB-Anschluss nur auf maximal 5 Meter verlängern lässt, um noch zuverlässig arbeiten zu können.

Da moderne Laptops nicht über eine COM-Schnittstelle verfügen, wird auch für den Garmin-Empfänger ein Adapter für die USB-Schnittstelle benutzt. Diese Art von Adapter stellen virtuelle serielle Schnittstellen zur Verfügung, welche für die Software über gleiche Parameter verfügen wie herkömmliche serielle Schnittstellen. Daher können sie genauso benutzt werden.

### 5.2.2 Programmiersprache

Das Programm für den Assistenten wird in der Programmiersprache *MS Visual Basic (VB) Version 6* geschrieben. Visual Basic ist eine verbreitete Programmiersprache von *Microsoft* für Windows-Anwendungen. Sie wurde seit 1990 aus dem Vorgänger *Quick Basic* entwickelt. Die Benutzeroberfläche lässt sich einfach zusammenstellen, so dass das Hauptmerk auf den eigentlichen Algorithmus gelegt werden kann. Einige Hinweise zur Programmiersprache werden im Folgenden kurz genannt.

Im Gegensatz zur Programmiersprache C ist *Visual Basic* stark an die englische Sprache angelehnt. Schlüsselwörter wie 'And' werden zum Beispiel ausgeschrieben. Generell ist keine Variablendeklaration vorzunehmen. Mit dem Befehl „Option Explicit“ kann jedoch eine Variablendeklaration erzwungen werden. Dies hat zum Vorteil, dass viele Programm-Fehler schon während der Kompilierung des Quellcodes gefunden werden. Hierdurch wird zum Beispiel eine Integer-Division (bei der das Resultat eine Ganzzahl ist) erzwungen. Visual Basic würde ohne Typdeklaration im Gegensatz zu vielen anderen Programmiersprachen bei der Division eine Dezimalzahl zurückgeben.

*Visual Basic* bietet zwei Möglichkeiten zur Erstellung von Unterprogrammen: 'Sub' und 'Function'. Eine 'Function' kann Rückgabewerte liefern, 'Sub' nicht.

'Functions' können öffentlich oder privat sein. Ist eine 'Function' mit dem Befehl 'PUBLIC FUNCTION <NAME> (<PARAMETER>)' als öffentlich deklariert, so ist sie aus dem gesamten Projekt ansprechbar. Mit 'PRIVATE FUNCTION <NAME> (<PARAMETER>)' deklarierte Funktionen sind nur innerhalb der Datei bekannt, in der sie stehen. Durch diese beiden Möglichkeiten lässt sich das Projekt besser strukturieren.

Die Struktur von Schleifen findet nicht durch Klammerungen, wie bei C mit geschweiften Klammern, sondern ausschließlich durch Schlüsselwörter statt. Dies hat zum Vorteil, dass ein Ende auch durch End If kenntlich gemacht werden muss, was die Übersichtlichkeit erhöht.

Aus Gründen der weiteren Übersichtlichkeit wurden Richtlinien für die Programmierung geschaffen. Dadurch sind für eine Programmfunktion entsprechende Codezeilen schneller aufzufinden und je nach Bedarf zu verändern. Durch die gewählte Syntax wird auch die Fehlersuche erleichtert.

Es wurde darauf geachtet, folgende Dinge einzuhalten:

- Deklaration von Variablen
- Operationen an der grafischen Oberfläche nur aus der Formular-Datei oder aus der Datei „Modul\_Zeichnen.bas“ heraus
- Wertübernahme aus grafischen Anzeige-Elementen nur dort, wo unbedingt notwendig
- Verwendung von lokalen Variablen mit Übergabe der Werte von Funktion zu Funktion

Diese Richtlinien sollen für einen schnelleren Programmablauf und eine gründlichere Struktur sorgen.

### 5.2.3 Design

Die Oberfläche und die Handhabung der Software sollte praktisch sein. Ziel soll sein, dass die Software selbsterklärend und einfach zu bedienen ist. Zu berücksichtigen ist, dass der Einsatz der Software auf einem Boot erfolgt. Die Schwankungen im Wasser erschweren die Arbeit am Computer, besonders die Benutzung der Maus. Die Schaltflächen werden daher möglichst groß gewählt.

#### Einbindung des Hafensplans

Eine Karte wie in Abbildung 1 dient als Übersicht für den Kapitän. Sie ist zur groben Übersicht gedacht, in der Start und Ziel per Mausklick eingegeben werden können. Primär dient die Karte jedoch als Anzeige der GPS- und Schiffsposition. Somit hat der Kapitän eine Kontrolle über die von der Software durchgeführte Navigation.

Die Start- und Zielposition können nach der Maus-Positionierung nachjustiert werden. In die vorgesehenen Felder können die Daten auch „per Hand“ eingegeben werden, sofern die Werte bekannt sind.

Als Hafenpläne lassen sich eingescannte Karten benutzen. Diese werden durch einen Eintrag des Dateinamens in eine Initialisierungs-Datei in die Software eingebunden (Näheres hierzu befindet sich in Kapitel 6.2.1). Diese entstandenen Pixel-Grafiken müssen zum Koordinatensystem referenziert sein. Hierfür ist eine zum Dateinamen gleiche Textdatei vorgesehen. In dieser steht für das Pixel (1,1) (Ecke oben links) der Mercator-transformierte Längen- und Breitengrad (Rechts- und Hochwert in Metern). Dieser Wert ist der Karte entnommen. Außerdem ist in der Textdatei der Maßstab vermerkt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird eine Karte verwendet, bei der ein Pixel in der Realität der Fläche eines Quadratmeters entspricht. Die Schiffsführung wird mit Hilfe der dezimalen Werte vorgenommen, da eine Navigation anhand der Pixel der Computergrafik nicht die gewünschte Genauigkeit erreichen würde.

### **Programmierbeispiel: Darstellung eines Pfeils für das Ziel**

Die Liegeposition des Schiffes (Ziel) wird durch einen Koordinatenpunkt  $(x, y)$  und einen Winkel  $(\alpha)$  beschrieben. Der Winkel dient hierbei dazu, die Lagerichtung festzulegen. Die Anzeige der Zieldaten soll zur übersichtlichen Darstellung durch einen Pfeil erfolgen. Somit lässt sich übersichtlich anzeigen, wohin das Schiff navigiert wird.

Für die Anzeige des Pfeils sind einige Rechenschritte erforderlich, da die Zeichnung nicht aus den gegebenen Daten erfolgen kann.

Für die Zeichnung eines Pfeils sind Start- und Endpunkt der drei Linien eines Pfeiles zu berechnen, so dass diese anschließend mit folgendem Visual-Basic-Befehl in die Zeichnung eingezeichnet werden können:

#### Listing 1: Zeichnen einer Linie

```
Line(x3,y3) - (x4,y4), colour
```

$x3$  und  $y3$  bezeichnen den Anfangspunkt der Linie,  $x4$  und  $y4$  bezeichnen den Endpunkt der Linie. Anstelle von 'colour' steht die Farbe, welche die Linie bekommen soll.

Für die Grundlinie des Pfeils ist die Berechnung einer Geradengleichung erforderlich. Die Gerade muss den bekannten Zielpunkt als Mittelpunkt haben, um den sich die Pfeilgrundlinie ausstreckt.

Außerdem muss die Gerade auch durch den Punkt verlaufen, der in der durch die Winkelangabe bekannten Richtung von dem Mittelpunkt liegt. Dieser Punkt wird als erstes bestimmt.

Als Ansatz hierfür wird ein  $x_2$ -Wert festgelegt. Dieser kann willkürlich festgelegt werden, da für jeden  $x$ -Wert ein gültiger  $y$ -Wert existiert. Somit ist nur noch der  $y_2$ -Wert zu berechnen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird als  $x_2$ -Wert der Wert  $x_1 + 1m$  gewählt.

Der  $y_2$ -Wert wird im Bezug zu  $y_1$  errechnet. Hierbei ist zunächst der Winkel in das radiant-Format umzurechnen.

$$\alpha_{rad} = \frac{\alpha_{deg} \cdot \pi}{180} \quad (4)$$

Die Differenz der Werte  $y_2$  und  $y_1$  wird mit  $\Delta y$  bezeichnet.

$$\Delta y = \cot(\alpha_{rad}) = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{rad}\right) \quad (5)$$

Die Berechnung muss über die Tangensfunktion vorgenommen werden, da Visual Basic nicht über eine Kotangensfunktion verfügt.

$$y_2 = y_1 + \Delta y \quad (6)$$

Die Gleichungen (4) und (5) lassen sich zusammenfassen:

$$\Delta y = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{deg} \cdot \pi}{180}\right) \Leftrightarrow \quad (7)$$

$$\Delta y = \tan\left((90 - \alpha_{deg}) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \Leftrightarrow \quad (8)$$

$$\Delta y = \tan((90 - \alpha_{deg}) \cdot 0,01745329252). \quad (9)$$

Durch diese Zusammenfassung werden dem Rechner die nicht notwendigen Zwischenrechen-schritte abgenommen.

Die Kotangens- bzw. die Tangensfunktion ist für einen Bereich über  $180^\circ$  definiert. Damit die Winkelberechnung über den gesamten Kompassbereich von  $360^\circ$  erfolgen kann, muss eine Fall-unterscheidung vorgenommen werden, ob der Winkel zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  oder zwischen  $180^\circ$  und  $360^\circ$  liegt.

Dementsprechend ist der  $x_2$ -Wert anzupassen. Für den Winkelbereich zwischen  $180^\circ$  und  $360^\circ$  beträgt dieser nun  $x_1 - 1m$  statt der oben erwähnten  $x_1 + 1m$ . Außerdem ist für die Berechnung

des y-Wertes der Winkel zu spiegeln, das heißt beispielhaft für die Berechnung des y2-Wertes bei  $340^\circ$  wird nicht die Berechnung des Wertes für  $340^\circ - 180^\circ = 160^\circ$  vorgenommen, sondern für  $360^\circ - 340^\circ = 20^\circ$ . Zusätzlich wird eine Variable *seite* benötigt, die die x-Werte des Pfeils richtig positioniert. Für den Fall  $< 180^\circ$  ist *seite* = 1, für den Fall  $> 180^\circ$  ist *seite* = -1.

Aus den bekannten Werten von x1 und y1 und den errechneten Werten von x2 und y2 lässt sich nun die Geradengleichung mit der Steigung m und dem y-Achsenabschnitt b berechnen.

$$m = \frac{y1 - y2}{x1 - x2} \quad (10)$$

$$b = y1 - m \cdot x1 \quad (11)$$

Als nächster Schritt kann die Berechnung der beiden Koordinatenpunkte für den Anfang (x3, y3) und das Ende (x4, y4) des Pfeiles erfolgen. Sie befinden sich im gleichen Abstand vom Mittelpunkt. Der Abstand der Werte x3 und x4 von x1 ist abhängig von der Steigung der Geraden. Dazu wird die Differenz auf der Abszisse zwischen dem Mittelpunkt x1 und dem gewünschtem Endpunkt berechnet

$$\text{diffx} = \sqrt{\frac{l}{m^2 + 1}}. \quad (12)$$

Der Wert *l* ist hierbei proportional zur Länge der Pfeil-Grundlinie. Mit dieser lassen sich im nächsten Schritt x3 und x4 berechnen, sowie y3 und y4, welche aus der Geradengleichung mit den schon bekannten Werten für m und b bestimmt werden

$$x3 = x1 + \text{diffx} \cdot \text{seite} \quad (13)$$

$$y3 = m \cdot x3 + b \quad (14)$$

$$x4 = x1 - \text{diffx} \cdot \text{seite} \quad (15)$$

$$y4 = m \cdot x4 + b. \quad (16)$$

Mit den jetzt bekannten Werten für (x3, y3) und (x4, y4) lässt sich nun die Grundlinie des Pfeils zeichnen wie im Listing 1.

Im Folgenden müssen noch die beiden Seitenlinien für die Pfeilspitze berechnet werden. Hierbei lässt sich erkennen, dass vorhergehende Überlegungen für die Berechnung der Seitenlinien übertragbar sind. Zunächst wird festgelegt, dass sich die Seitenlinien im Winkel von  $30^\circ$  von der

Grundlinie befinden. Der Linienanfangspunkt (Pfeilspitze) ist mit  $(x_4, y_4)$  bereits festgelegt. Mit dem angenommenen Winkel und der gewünschten Länge der Linien können nun Koordinaten von Endpunkten der beiden Linien berechnet werden.

Zunächst muss dieser Winkel in das radiant-Format umgerechnet werden. Anschließend werden die beiden x-Werte und y-Werte mit den Formeln (12) bis (16) bestimmt, sowie die Linien mit dem bekannten Befehl gezeichnet.

#### 5.2.4 Ansprechen der seriellen Schnittstelle

Für die Kommunikation mit Peripherie über serielle Schnittstellen unter Windows XP ist ein Zusatzmodul aus [Dit] notwendig, welches Rechte besitzt, über das Betriebssystem mit der Schnittstelle kommunizieren zu können.

Bei der Verwendung der seriellen Schnittstelle kann es zu mehreren Ausnahmen kommen, die gründlich abgefangen werden müssen. Zum einen kann es sein, dass die Schnittstelle nicht existiert oder sich nicht öffnen lässt. Es kommt zu einer Fehlermeldung und das Programm wird abrupt beendet. Zum anderen kann es sein, dass an der geöffneten Schnittstelle kein Gerät angeschlossen ist. Das Einlesen von Daten von dieser Schnittstelle funktioniert nicht, es kommt allerdings zu keiner Fehlermeldung, da das Modul, welches mit der Schnittstelle kommuniziert, so lange wartet, bis Daten an der Schnittstelle zum Lesen anliegen. Das Programm befindet sich in dem Fall in einer Endlosschleife.

Lassen sich keine Daten von der seriellen Schnittstelle empfangen, hängt nicht das komplette Programm sondern nur der Prozess. Um diesen potenziellen Fehler zu umgehen, wird das Lesen der Daten nach einer Sekunde abgebrochen. In dieser Zeit sollte im Normalfall ein gültiger Positionsdatensatz gesendet worden sein.

Zwischen den Aufrufen zum Lesen von der seriellen Schnittstelle vergehen 1,2 Sekunden (Navilock) bzw. 1,4 Sekunden (Garmin). In dieser Zeit kann sich der Puffer der Schnittstelle füllen, da die Daten von den GPS-Empfängern kontinuierlich gesendet werden. Für den Garmin-Empfänger wird eine längere Zeit gewählt, da dieser länger braucht, um den gewünschte NMEA-Datensatz erneut anzuzeigen. Dies liegt daran, dass er im Gegensatz zu dem Navilock-Empfänger mehrere unterschiedliche Datensätze sendet. Die Zeiten wurden empirisch ermittelt. Durch unterschiedliche Zeitspannen ist die Zeit zur Anzeige von aktualisierten Daten geringer, da bei jeder Aktua-

lisierung eines Empfängers die Daten neu berechnet werden. Bei jedem Aufruf zum Lesen von der Schnittstelle wird der Puffer-Inhalt gelesen und der Puffer gelöscht.

Bei dem Umgang mit den seriellen Schnittstellen bzw. den GPS-Empfängern muss darauf geachtet werden, dass ungültige Daten nicht weiterverarbeitet werden. Ungültige Daten liegen zum Beispiel dann vor, wenn ein Lesefehler aufgetreten ist. Im ungünstigsten Fall werden diese als Positionswerte interpretiert. Dies würde zu einem Fehlverhalten im gesamten Programm führen. Es lässt sich jedoch eine Abhilfe gegen dieses Problem schaffen. Hierzu werden die Positionswerte gespeichert. Ab der zweiten Messung werden dann die gespeicherten Werte mit der vorherigen Messung verglichen. Ist die Abweichung größer als 1 km, so ist der Wert garantiert falsch. Für die Weiterverarbeitung wird in dem Fall nicht der neue Messwert verwendet, sondern der alte Messwert. Zusätzlich wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

### 5.3 Fusion von Sensordaten und Positionskorrektur

Die von beiden Empfängern gemessenen Positionen werden kontinuierlich in das Mercator-Format transformiert, so dass kartesische Koordinaten mit Längenmaßen vorliegen. Die Umwandlung wird mittels bekannter Formeln vorgenommen (siehe [Bau] S.76).

Die Fusion der Sensordaten, das heißt, die Verknüpfung der beiden messenden GPS-Empfänger, geschieht im Anschluss an die Umwandlung in das Mercator-Format. Sie ist erforderlich um den Kurs der Yacht zu bestimmen. Der errechnete Abstand der Empfänger zueinander ermöglicht es die Genauigkeit abzuschätzen.

Der Abstand zwischen den beiden Empfängern kann mittels des Satz des Pythagoras berechnet werden. Der Winkel ist der Arkustangens aus der Steigung (Division von  $\Delta$ Hochwert und  $\Delta$ Rechtswert).

Generell wird davon ausgegangen, dass die mit den GPS-Empfängern gemessene Position von der wahren Position um mehrere Meter und mehrere Grad abweicht. Deshalb ist es notwendig, die aktuell gesichtete Position mit der gemessenen Position zu verknüpfen. Hierfür wird jeder Messwert mit dem zu Anfang bestimmten Differenzvektor addiert.

Die Differenz der beiden Punkte soll während der ganzen Manövrierphase bestehen bleiben, das heißt, es wird mit einer so genannten Pseudoposition weitergerechnet, die aus der gemessenen Position und der Differenz zur tatsächlichen Position besteht.

Diese Art von Navigation mit einer Pseudoposition ist so lange vertrauenswürdig wie keine Satellitenwechsel stattfinden. Wenn ein Wechsel stattgefunden hat, das heißt ein Satellit ist hinter den Horizont gewandert, findet die Positionsberechnung plötzlich mit einem anderen Satelliten statt, dessen Uhr eventuell nicht genau genug geht. Daher kann im ungünstigsten Fall eine drastische Positionsänderung stattfinden, die jedoch oft schnell auffällt. Mehrere Tests in der Praxis sind für eine Fehlerabschätzung erforderlich.

## 5.4 Algorithmus zum Erreichen der Anlegestelle

Um die Anlegestelle anzusteuern, sind Vorgaben für die Einstellung am Ruder und Schub erforderlich. Dies sind die beiden Eingriffsmöglichkeiten um das Schiff zu steuern. Hierzu muss zunächst ein geeigneter Weg berechnet werden, den das Schiff durch das Hafenbecken nehmen soll. Im Anschluss an die Routenplanung (Solltrajektorie), sind die Steuereingriffe (Ruder und Schub) zu ermitteln, die zum Folgen der Solltrajektorie erforderlich sind. Mit diesen Werten wird anschließend eine Simulation durchgeführt. Im Idealfall stimmt die Simulation mit der Solltrajektorie überein. Das Ergebnis dieser ersten Simulation soll rückführend in die Ermittlung neuer Aktorwerte einfließen, um den Prozess der Simulation so zu optimieren, dass das Schiff genau den vorgeschlagenen Weg einschlägt. Dieser Vorgang wird in Kapitel 5.5 erläutert.

### 5.4.1 Ermittlung von Anlegelinie (Trajektorienplanung) und Aktordaten (Näherung)

Vor der Berechnung der Anlegelinie müssen die Zieldaten, das heißt die genaue Anlegestelle der Yacht, in der Karte bestimmt werden. Die Zieldaten bestehen wie die Startdaten aus den selben Parametern (Hoch- und Rechtswert sowie Orientierung). Wenn für Start und Ziel jeweils die drei notwendigen Daten vorliegen, kann hieraus die Fahrtroute bestimmt werden (Wegfindung).

Die Fahrtroute soll ein Polynomzug dritten Grades sein (kubisches Polynom). Polynome dritten Grades werden durch vier Stützpunkte, bzw. durch zwei Punkte und zwei Steigungen (hier: Orientierung/Kurs) festgelegt. Genau diese stehen durch die zuvor festgelegten Werte zur Verfügung, so dass der Polynomzug eindeutig bestimmt ist.

Einschränkend ist hierbei zu erwähnen, dass es vorerst nur möglich ist, das Schiff in die gleiche Ost-/Westrichtung fahren zu lassen, in der es steht. Der Grund hierfür ist, dass andernfalls das

Schiff drehen müsste. In diesem Fall wären zu einer Stelle zwei Werte möglich (vor und nach der Drehung).

Mathematisch betrachtet kann jedoch für einen x-Wert der Funktion nur ein gültiger y-Wert existieren. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Hier kann man sehen, dass für eine Drehung ein x-Wert zwei Mal überschritten wird.

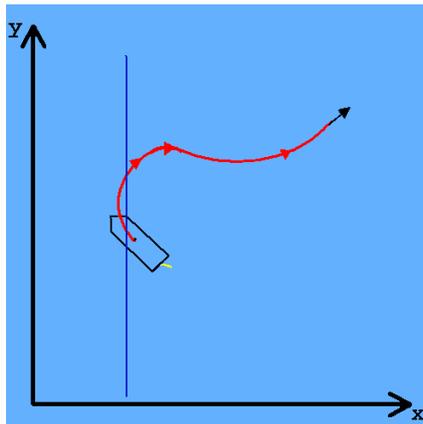


Abbildung 7: Schiff muss in entgegengesetzte Richtung drehen

Dieses Problem lässt sich lokal lösen, indem das Koordinatensystem für die Berechnung programmintern um  $90^\circ$  gedreht wird. Das Problem ist nur lokal gelöst; es kann unter Umständen an einer anderen Stelle wieder auftreten (wie für vorliegenden Fall in Abbildung 8).

In der nun gedrehten Grafik wird innerhalb des Anlegekurses ein weiterer x-Wert doppelt berührt. In diesem Fall ist es erforderlich, nach erfolgter Drehung des Schiffes eine erneute Route berechnen zu lassen.

Möglicherweise lässt sich ein besserer Winkel für die Drehung finden, so dass diese nur einmal durchgeführt werden muss. Dies müsste für jede Route speziell untersucht werden und wird nicht eingehender betrachtet.

Die Formel (17) zeigt die Zuordnungsvorschrift eines kubischen Polynoms. Die Formel (18) dient der Berechnung des Winkels. Die Variable 'Kurs1' ist hierbei der jeweilige festgelegte Winkel. Der Zielwinkel berechnet sich analog zur Startwinkelberechnung.

$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (17)$$

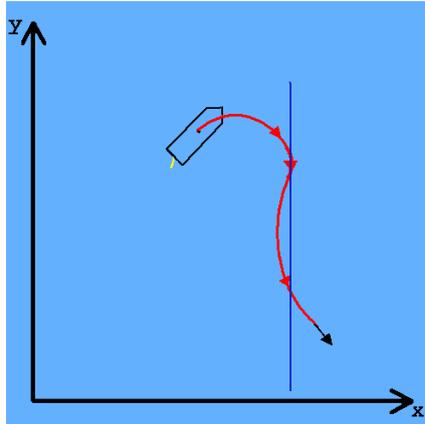


Abbildung 8: Schiff im gedrehten Koordinatensystem

$$\text{Startwinkel} = \tan\left(\text{Kurs1} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (18)$$

Für die Berechnung der Funktion und damit der gewünschten Route müssen die vier Koeffizienten (a, b, c und d) berechnet werden. Die Berechnung erfolgt mit folgenden Gleichungen (19) bis (22).

$$a = 2 \cdot y1 - 2 \cdot y2 + \text{Startwinkel} + \text{Zielwinkel} \quad (19)$$

$$b = 3 \cdot y2 - 3 \cdot y1 - 2 \cdot \text{Startwinkel} - \text{Zielwinkel} \quad (20)$$

$$c = \text{Startwinkel} \quad (21)$$

$$d = y1 \quad (22)$$

Die Funktionsgleichung ist somit bekannt und der Anlegekurs festgelegt, sofern das Koordinatensystem für die gesamte Zeit der Navigation gleich bleibt. Davon wird im Weiteren ausgegangen.

Es lassen sich im folgenden Schritt die Funktionswerte (Hochwerte) für eine bestimmte Intervallbreite (Rechtswerte) berechnen. Die Intervallbreite entspricht hierbei dem Zeitabschnitt, für den ein Vorgabewert gültig sein soll. Dieses Intervall soll die Größe  $1 \text{ s} \hat{=} 1 \text{ m}$  in x-Richtung haben. Das heißt, dass in jeder Sekunde die Werte für Ruder und Schub angepasst werden sollen.

Die Funktionswerte des Anlegekurses werden mit der Gleichung (23) berechnet:

$$y_i = a \cdot x_i^3 + b \cdot x_i^2 + c \cdot x_i + d \quad (23)$$

mit  $x_i = 1/\text{Intervallanzahl} \cdot \text{Intervallnummer}$ , somit  $0 < x_i \leq 1$ . Diese normierte Formel ist somit universell für beliebige Funktionsstellen und beliebige Intervallgrößen gültig.

Für eine Intervallanzahl von  $N=20$  geht  $x_i$  von 0,05 bis 1.

Aus den Intervallen lassen sich außerdem die Funktionsstellen (in diesem Fall die Rechtswerte) festlegen.

Hierfür wird die reale Intervallbreite (Abstand zwischen zwei Rechtswerten in Meter) mit der laufenden Intervallnummer multipliziert und zu dem Rechtswert des Schiffsursprungs addiert.

Dies ist in Gleichung (24) dargestellt:

$$x = x_{min} + i \cdot (x_{max} - x_{min}). \quad (24)$$

Die Berechnung des Polynoms mit den einzelnen Punkten wird in dem Modul „Modul\_Streckenpolynom“ vorgenommen. Die Funktion erwartet bei ihrem Aufruf die Startkoordinaten  $x_1$  und  $y_1$  sowie den Kurs des Schiffes  $k_1$  und die Zielkoordinaten  $x_2$  und  $y_2$  sowie den Kurs des Ziels  $k_2$ .

Listing 2: Funktionsaufruf zur Berechnung der Anlegelinie

```
Private Function polynom(x1 As Double, y1 As Double, k1 As Double, _
x2 As Double, y2 As Double, k2 As Double)
```

In dieser Funktion wird die Anlegelinie berechnet. Aus dieser Funktion heraus werden weitere Funktionen im Modul aufgerufen, die die Vorgabewerte zur Steuerung des Schiffes berechnen.

Diese als Aktorwerte bezeichneten Stellgrößen sind geschätzte Werte, die das Schiff im ersten Schritt in die Richtung bewegen, in die es fahren soll. Somit muss zum Beispiel für jeden x-Wert die Ruderstellung berechnet werden, um den zeitlich darauf folgenden x-Wert anzusteuern.

Die erste Simulation kann mit den berechneten Näherungen vorgenommen werden. Durch diese Näherungen wird das Schiff vom gewünschten Kurs (Soll-Trajektorie) während der Erst-Simulation abdriften.

Der Grund für das Abdriften soll im nachstehenden Beispiel erklärt werden. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass man dem Schiffsmotor Beschleunigungswerte als Schub vorgeben kann.

Das Schiff befindet sich an einer Position. Für diese Position wird nach der Berechnung der Anlegelinie eine Beschleunigung eingestellt, um die Folgeposition zu erreichen. Mit dieser Beschleunigung soll das Schiff laut Anlegelinie den nächsten Intervallpunkt in der Zeitdifferenz des Intervalls erreichen. Der physikalische Zusammenhang ergibt sich aus folgenden Gleichungen (25) und (26):

$$v = \frac{ds}{dt} = \dot{s}. \quad (25)$$

Formel (25) ist gültig wenn die geforderte Geschwindigkeit während des Starts vorhanden ist und sich nicht ändert. Ist dies nicht der Fall, muss noch die Beschleunigung aus (26) einfließen:

$$a = \frac{dv}{dt} = \dot{v} = \ddot{s}. \quad (26)$$

Die Vorgabe für die Beschleunigung errechnet sich demnach aus dem zurückzulegenden Weg in der zurückzulegenden Zeit und der Geschwindigkeit zur Startzeit. Geht man für die einzelnen Intervalle zur Näherung von einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit aus, so gilt Formel (27) [Kuc],

$$s = v \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \Leftrightarrow a = \frac{2 \cdot (s - t \cdot v)}{t^2}. \quad (27)$$

Während der gesamten Zeitdauer wird jedoch immer nur die Geschwindigkeit, die das Schiff theoretisch haben soll, betrachtet und in die Berechnung mit einbezogen. Da die Vorgabe des Schubes im Schiffsmodell nicht mit der Vorgabe einer Beschleunigung gleichgesetzt werden kann (Dynamik vernachlässigt), ist die Berechnung nur eine gute Annäherung und keine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Man kann die Schubvorgabe auch mit dem Gaspedal eines Autos vergleichen, die Stellung ist auch hier weder proportional zur Geschwindigkeit, noch zur Beschleunigung des Autos.

Für die Stellung des Ruders ist die Wendestelle in der Anlegelinie signifikant. Ist eine Wendestelle vorhanden, wird hier die Ruderstellung von der einen Richtung in die andere bewegt. Für die Berechnung der Wendestelle, bzw. der sekundlich wiederkehrenden Vorgabe für das Ruder, wird die zweite Ableitung der Anlegelinie berechnet. Mit dem Arkustangens der zweiten Ableitung bekommt man einen Wert, welcher proportional zu der „richtigen Ruderstellung“ ist. Man muss diesen noch mit (-1) multiplizieren, da sich ein Schiff immer entgegengesetzt zur Ruderstellung

dreht. Da die Drehung des Schiffes nicht alleine von der Stellung des Ruders abhängig ist, sondern auch von der Geschwindigkeit des Schiffes, ist die Ruderstellung auch nur eine Näherung.

Auch wenn diese beiden Näherungsvorgaben stark von den idealen Einstellungen abweichen, sind sie geeignet die spätere Optimierung zu initiieren. Es ist hierbei lediglich erforderlich das Schiff ungefähr in die Richtung zu bewegen in die es fahren soll.

Da die beiden Vorgaben also nur Schätzwerte sind und die Schiffsbewegung außerdem noch durch viele äußere Einflüsse gestört wird, kommt es zu dem oben erwähnten Abweichen von der Solltrajektorie. Dieser Abdrift, der natürlich ebenso in der Realität auftritt, wurde durch verschiedene Parameter in SUSAN berücksichtigt. SUSAN ist jedoch nicht dafür ausgelegt, ständig ändernde Wind- und Wasserbedingungen zu simulieren.

Die Positionen, die das Schiff während der Simulation ansteuert, werden gespeichert. Im Anschluss an die Navigation lassen sich aus diesen Daten Erkenntnisse gewinnen, wie sich das Ziel genauer ansteuern lässt. Demnach ist eine Fehlerkorrektur, bzw. Fehlerminimierung notwendig.

Die Fehlerminimierung wird nach einem Algorithmus vorgenommen, der die Eigenschaft hat, Funktionsminima zu finden [Ros]. Dieses Verfahren wird genauer im Kapitel 5.5 erklärt.

#### 5.4.2 Anzeige der Stellgrößen

Die Stellgrößen dienen als Schnittstelle zwischen Computer und Schiff. Sie sind die Aktoreingänge von Ruder und Schub und zeigen an, wie gesteuert wird. Hierzu ist die Anzeige von Schub und Kurs notwendig. Grafisch wird dies in den Zeichenflächen des Programms dargestellt. Eine numerische Anzeige wird in der Form einer Tabelle gemacht, die sich nach der Berechnung des Polynoms öffnet. Eine Beispieldaten-Tabelle ist in Abbildung 10 zu finden. Zusätzlich werden bei der Simulation die für die jeweilige Sekunde gültigen Aktordaten auf der Programmoberfläche angezeigt.

Das Zeichnen der Route wird wie alle übrigen grafischen Operationen aus dem Modul „Modul Zeichnen“ vorgenommen. Aus dem Modul heraus wird die Funktion zur Errechnung der Koeffizienten aufgerufen. Diese Funktion bedient auch gleichzeitig die Zeichenfläche der Karte.

Auf der Zeichenfläche werden für die Route an den entsprechenden Funktionswerten Punkte eingezeichnet. In Visual Basic lassen sich mit folgender Funktion Punkte zeichnen:

## Listing 3: Punktzeichen

```
Simulation.Picture1.Circle (pixelx1 , pixely1) , 4 , colour
```

'Simulation' steht hierbei für das Formular. Als Formular wird in Visual Basic die grafische Beschreibung eines Fensters bezeichnet. 'Picture1' kennzeichnet das Zeichenfeld, in diesem Fall die Hafenkarte.

Im Rahmen der Simulation am Schiffsmodell werden die Aktordaten direkt den Variablen zugewiesen, die das Schiff steuern. Dieser Vorgang wird mit einem Zähler gesteuert, der jede Sekunde die Daten aus einer Tabelle liest und in die Variablen kopiert.

Der Timer läuft mit einer Intervallgröße von 50 ms. Das heißt, die Befehle, die in der Timeroutine stehen, werden alle 50 ms wiederholt aufgerufen. Hierbei handelt es sich insbesondere um den Integrator, mit dem im Modell die Schiffsbewegung berechnet wird. Der Integrator berechnet mit vorhandener Geschwindigkeit, Position und Richtung sowie Ruderstellung und Schub quasi kontinuierlich die neue Geschwindigkeit, neue Position und neue Richtung.

Während jedes Timeraufrufs wird eine globale Variable hochgezählt, die bei einem Stand von 20 (also nach  $20 \cdot 50 \text{ ms} = 1 \text{ s}$ ) auf 0 zurückgesetzt wird und gleichzeitig die neuen Vorgaben für Schub und Ruder an die Integratorroutine übergibt. So werden sekundlich Werte an Ruder und Motor übergeben.

## 5.5 Optimierung der Aktordaten (Präzision)

Während der Simulation werden die aktuellen Werte von Position, Kurs und Vorwärts-Geschwindigkeit der Yacht sekundlich in die Tabelle kopiert. Nach einer Simulation liegen demnach in der Tabelle Werte für die Punkte der berechneten Anlegelinie, die daraus berechnete Trajektorie und Werte für die tatsächlich gefahrene Strecke vor. Für die Übersichtlichkeit wurden vorerst 20 Zeitschritte gewählt. Das heißt, nach 20 Sekunden (entspricht 400 Integrationsschritten) soll das Schiff von seiner Startposition das Ziel erreichen. In der Realität muss diese Zeit an die Gegebenheiten angepasst werden, die das Schiff unterwegs sein soll. Die 20 Zeitschritte sollen vorerst nur dazu dienen, das Optimierungsverfahren vorzustellen und Anpassungen daran vorzunehmen. In der Tabelle von Abbildung 10 kennzeichnet die Spalte Zeit das jeweilige Intervall. In der zweiten Spalte (Kurs) befindet sich der Kompasskurs nach dem gefahren werden muss,

um von einer Position die Position in der folgenden Zeile zu erreichen. Er berechnet sich aus dem Arkustangens der Steigung des Polynoms zwischen den beiden besagten Punkten. In der dritten Spalte steht die Stellgröße des Ruders für den Punkt (2. Ableitung). Die vierte und fünfte Spalte kennzeichnen die Punkte des Polynoms, die darauf folgende Spalte die Längendifferenz zwischen den einzelnen Punkten. Die Spalte mit der Bezeichnung „Reststrecke“ enthält die abgezogenen Längen (in dem Intervall schon abgefahrene Strecke) nach Aufsummierung aller Längendifferenzen. In der nächsten Spalte (Vorschlag a) steht die Vorgabe für den Schub. Die Daten dieser und der dritten Spalte entsprechen den Größen, die dem Integrator bei einer grafischen Simulation übergeben werden. Hierin stehen also nach der Optimierung auch die neuen Werte, sowie die vor der Optimierung vorhandenen Schätzwerte. Die drei folgenden Spalten werden während der Simulation gefüllt und zeigen Position sowie Geschwindigkeit zum jeweiligen Zeitpunkt an.

Aus diesen vorhandenen Daten ist es möglich, neue Daten zu berechnen, die das Schiff auf der gewünschten Anlegelinie fahren lassen. Um Aktorwerte zu berechnen, die das Schiff so steuern, dass es genau auf der Anlegelinie fährt, muss ein allgemein bewertbares Gütekriterium geschaffen werden. Damit ist ein Zusammenhang zwischen Soll- und Ist-Werten gemeint, der numerisch bewertbar ist. Hierfür ist es notwendig, dass die Differenz zwischen Anlegelinie und gefahrener Linie der ersten Simulation minimiert wird.

Um eine zu minimierende Gütefunktion zu schaffen, sollen die drei Positionsdaten  $x$ ,  $y$  und Richtungswinkel von Soll- und Ist-Werten zueinander betrachtet werden. Außerdem muss auch die Geschwindigkeit in der Gütefunktion berücksichtigt werden. Diese soll nur so hoch wie nötig sein, so dass das Schiff nicht in dem folgenden Intervall abrupt abbremsen muss.

Es ist außerdem zwingend erforderlich, grundsätzlich die Geschwindigkeit bei der Optimierung zu berücksichtigen und bei jedem Aufruf des Integrators während der Optimierung, dem Integrator den alten Geschwindigkeitswert zu übergeben. Dies ist erforderlich, weil die Optimierung Punkt für Punkt geschieht und das Schiff schließlich nicht bei jedem Erreichen einer neuen Position auf der Anlegelinie abbremsst. Dieses wäre in der Realität auch nicht der Fall. Demnach wird vor einem Integratoraufruf mit neuen Ruder- und Schubwerten (jedes 20. Mal) eine Speicherung des Integratorstands vorgenommen.

Eine taugliche Funktion erhält man, indem man von jedem Soll-Wert den Ist-Wert subtrahiert und diese Differenz anschließend quadriert. Somit erhält man als Fehlerquadrat stets einen positiven Wert. Summiert man nun alle Fehlerquadrate für  $x_i$ ,  $y_i$  und  $\varphi_i$  (Winkel), hat man eine

bewertbare Gütefunktion, welche im Idealfall den Wert 0 hat; dann fährt das Schiff genau auf der Anlegelinie.

Es müssen also nun gültige Aktorwerte berechnet werden, die die Gütefunktion minimal werden lassen. Diese Berechnung erfolgt mit dem Verfahren der Modell-prädiktiven-Regelung (model predictive control - MPC) und gleitendem Horizont. Das heißt, es wird nicht der komplette Anlegevorgang in einem Schritt optimiert (nicht alle Fehlerquadrate in einem Vorgang aufsummiert).

Unter einem gleitenden Horizont ist zu verstehen, dass nicht in einem Schritt alle Aktorwerte für den gesamten Zeitraum der Trajektorie berechnet werden. Es kann hier zwischen zwei Horizonten unterschieden werden, dem Beobachtungshorizont und dem Stellhorizont. Der Beobachtungshorizont betrachtet den Teil der Gütefunktion, die es zu minimieren gilt, das heißt die gewünschte Anzahl der Intervalle. Der Stellhorizont kann sich jedoch auch auf eine geringe Anzahl von Intervallen beschränken. Im Stellhorizont werden die Stellgrößen angepasst.

Der Stellhorizont ist auf vier Zeitschritte beschränkt, das heißt, es wird eine Optimierung anhand der Werte der jeweils folgenden vier Sekunden vorgenommen. Der Stellhorizont könnte auch sofort die gesamten 20 Sekunden betrachten. Hierfür wird jedoch eine große Menge an Rechenleistung vom Computer benötigt. In der Realität sind die Messgrößen der Position nicht so gut vorhersehbar wie bei dem Modell, bei welchem immer die gleichen Integrationssschritte ablaufen, um das Schiff fort zu bewegen. Eine grafische Darstellung der einzelnen Zusammenhänge ist in der Abbildung 9 zu sehen.

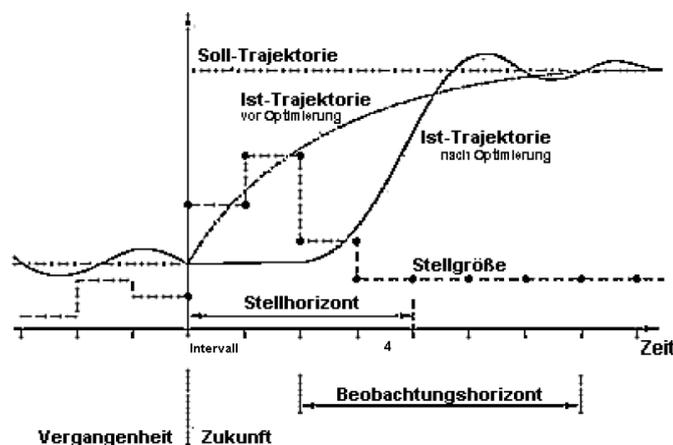


Abbildung 9: Schema der Modell-prädiktiven-Regelung

Wenn der Beobachtungshorizont nicht der Größe des Stellhorizontes entspricht, kann das Gütekriterium jedoch nicht unendlich klein werden, da auf die verbleibenden Intervalle, die im Bereich zwischen Ende des Stellhorizontes und Ende des Beobachtungshorizontes liegen, kein Einfluss genommen wird. In diesem Fall werden die Stellgrößen für die restlichen Intervalle mit den vorausgerechneten Werten beaufschlagt. Es sollen mehrere Horizontgrößen untersucht werden, um effiziente Funktionsminima zu finden.

Zu dem Gütekriterium ist zu erwähnen, dass hier außerdem Ruder- und Schubgrößen einfließen können und sollen. Der Grund hierfür ist, dass der Optimierungsalgorithmus versuchen soll, die Funktion mit geringem Schub und kleinem Ruderwinkel zu minimieren. Ferner fließt auch die Geschwindigkeit mit ein.

Der Wert für das Gütekriterium kann dann zwar nicht mehr '0' werden, (da das Schiff keine Möglichkeit hat ohne eine Ruder- und Winkelgröße auf dem Anlegekurs zu fahren), lässt aber den Wert des Funktional für kleine Stellgrößen auch kleiner werden. Wie groß der Einfluss der einzelnen Terme Ruder, Schub,  $x$ ,  $y$ , Geschwindigkeit und  $\varphi_i$  sein soll lässt sich mit Vorfaktoren festlegen. Hierauf wird kurz im Kapitel 6.1 eingegangen.

Die Funktionsminima des Gütekriteriums werden nach dem „Rosenbrock-Verfahren“ [Ros] berechnet. Mit dem Rosenbrock-Verfahren lassen sich Minimalwerte von Funktionen numerisch berechnen. Die Funktion kann mehrdimensional und höheren Grades sein. Daher eignet sich das Verfahren besonders gut für den vorliegenden Fall, da für 4 Schritte und 2 Steuereingriffe = 8 Suchrichtungen (entsprechen 8 Variablen des Suchraums) vorliegen. Das Rosenbrock-Verfahren ist ein Suchalgorithmus und kommt ohne Ableitungen der Funktion aus. Das macht dieses Verfahren zwar im Allgemeinen langsamer, aber auch zuverlässiger und einfacher. Es sucht iterativ nach immer besseren Stellgrößen, für die die angegebene Funktion minimal wird.

Es wird hierbei im Funktionsaufruf mit den Stellgrößen der Funktionswert berechnet. In diesem Funktionsaufruf wird genau wie in der Simulation der Integrator eingesetzt um neue Werte für  $x$ ,  $y$  und  $\varphi_i$  zu berechnen, die dann direkt wie oben erwähnt mit den Ist-Werten verglichen werden.

Listing 4 beschreibt den Funktionsaufruf. Er wurde um die Gewichtung und die Variablendeklaration gekürzt, ist jedoch im Anhang (CD-ROM) komplett zu finden. Hierbei ist auch die Hin- und Rückspeicherung des Integratorstands zu erkennen. Ist der Optimierschritt für ein Intervall abgeschlossen, muss der aktuelle Stand der Variablen des Integrators von dem Schiffsmodell zwischengespeichert werden. Diese müssen dem Integrator vor der Berechnung des nächsten Inter-

valls zurückgegeben werden, damit er, wie in der Realität, nicht mit einem stationären Zustand arbeitet. Schließlich ist das Schiff während der Optimierphase in Bewegung. Dieser Vorgang wird global und lokal vorgenommen und ist notwendig, da alte Werte sowohl während eines Optimieraufrufs geladen werden müssen als auch während eines einzelnen Funktionsaufrufs.

Listing 4: Funktionsaufruf der zu minimierenden Gütefunktion

```

Private Function funktion(var_x , hor)
If hor > 1 Then 'dann sind x,y nicht mehr die Anfangswerte,
    'sondern Simulationswerte
    X = kurvsimux(hor - 1) - Simulation.Karterechts
    y = Simulation.Kartehoch - kurvsimuy(hor - 1)
    Phi = kompasskurs(hor - 1) / 180 * Pi
End If
'Werte am Ende der "Probierintegration" zurückspeichern
x_save = X
y_save = y
phi_save = Phi
dx_save_intern = dx
dy_save_intern = dy
dxp_save_intern = dxp
dyp_save_intern = dyp
dPhip_save_intern = dPhip
dPhi_save_intern = dPhi
geschw_save_intern = Geschw
vorgeschw_save_intern = VorGeschw
quergeschw_save_intern = QuerGeschw
For I = hor To Gesamtzeit
    'hier: Werte im Stellhorizont
    If I <= (hor + 3) Then
        Schub = var_x(((I - hor) + 1) * 2 - 1)
        alpha = var_x(((I - hor) + 1) * 2)
    Else
        'sonst: bekannte Werte übernehmen

```

```

        Schub = a_vorschlag(I)
        alpha = Rudersteigung(I)
        End If
        Schub = Schub / 10 * NennSchub
        alpha = alpha * Pi / 180
'wieviele Integrationsschritte = 1 Sekunde :=20!
        For count2 = 1 To 20
            Call Integration 'hier: Aufruf von SUSAN
        Next count2
'x und y ist speichern
        kurvsimux(I) = Simulation.Karterechts + X
        kurvsimuy(I) = Simulation.Kartehoch - y
        kompasskurs(I) = Phi * 180 / Pi
'Integriererstand speichern, jedoch nur nach dem ersten Schritt.
'hier setzt der Integrierer beim Optimiervorgang für
'das nächste Intervall an
            If I = hor Then
                dx_save = dx
                dy_save = dy
                dxp_save = dxp
                dyp_save = dyp
                dPhip_save = dPhip
                dPhi_save = dPhi
                geschw_save = Geschw
                vorgeschw_save = VorGeschw
                quergeschw_save = QuerGeschw
            'somit wird bei der letzten Integration der erste Satz gespeichert,
            'wird der Horizont erweitert, ist dies dann Grundlage
        End If
Next I
'x,y muss zurückgespeichert werden, interne Integrierstellung auch
X = x_save

```

```

y = y_save
Phi = phi_save
dxp = dxp_save_intern
dx = dx_save_intern
dyp = dyp_save_intern
dy = dy_save_intern
dPhip = dPhip_save_intern
dPhi = dPhi_save_intern
Geschw = geschw_save_intern
VorGeschw = vorgeschw_save_intern
QuerGeschw = quergeschw_save_intern
'Integrierer zurücksetzen, aber nicht auf 0, sondern auf Anfangswerte:
For I = hor To gesamtzeit
    K_diff = kompasskurs(I) - Soll_Kurs(I)
    If K_diff < 0 Then K_diff = Abs(K_diff + 360)
    If K_diff > 180 Then K_diff = Abs(K_diff - 360)
    X_diff = (kurvsimux(I) - kurvex1(I)) ^ 2
    Y_diff = (kurvsimuy(I) - kurvey1(I)) ^ 2
    A_diff = var_x(I) ^ 2
    R_diff = var_x(I + 2) ^ 2
    funktion = funktion + X_diff + Y_diff + K_diff + A_diff + R_diff
Next I
End Function

```

Wie bei anderen numerischen Verfahren werden alte, ungenaue Funktionsergebnisse verworfen, wenn genauere (hier: minimalere) gefunden worden sind und die dafür verantwortlichen Stellgrößen in Richtung der letzten Anpassung weiter verschoben.

Nach erfolgreicher MPC stehen Größen für eine Steuerung zur Verfügung. Dies ist sinnvoll, da in der anschließenden Simulationsphase das Modell nicht mehr rückgekoppelt wird und kein Regler mehr vorhanden ist (Simulationsergebnisse werden nicht verarbeitet). In der Praxis muss man für vergangene Intervalle versuchen, die Zukunftswerte vorherzusagen wenn bestimmte Stellgrößen zur Steuerung herangezogen werden. Es findet hier auch keine direkte Rückkopplung statt,

sondern die Positionen werden lediglich per GPS gemessen und stehen ohne jeglichen Bezug zur Verfügung.

Im Listing 5 ist beschrieben, wie der Aufruf zur Optimierung erfolgt.

Listing 5: Funktionsaufruf zur Optimierung der Parameter

```
aw_neu = rosenbrock(hor)
```

Die Variable *hor* kennzeichnet die fortlaufende Nummer des ersten Intervalls des Beobachtungshorizonts und auch des Stellhorizonts, da sie im gleichen Intervall beginnen; *aw\_neu* steht hierbei für das Ergebnis der Rosenbrock-Optimierung, es ist ein Array mit den beiden Werten für Schub und Ruder (für ein Intervall). Die Größen für ein Intervall sind hierbei ausreichend, da nur diese für die Ansteuerung übernommen werden.

Die Rosenbrock-Optimierung läuft wie folgt ab:

In der Funktion werden die acht Suchrichtungen in einem Array gespeichert. Mit diesen wird der Funktionsaufruf gestartet, der einen Wert für die Fehlerquadrate errechnet, den es zu minimieren gilt.

Hierbei werden die Werte der acht Suchrichtungen 'e(j)' angepasst und ein erneuter Funktionsaufruf gestartet. Die Werte für die Suchrichtungen werden so verschoben, dass der Funktionsaufruf immer einen kleineren Wert zurückgeben soll. Sollte der Wert größer sein, wird der Vorgabewert in die andere Richtung verschoben.

Da für jedes Intervall eine Optimierung vorgenommen wird, sind 20 einzelne Rosenbrock-Optimierungen notwendig.

Im nächsten Schritt wird der Horizont verschoben und die neuen Werte der Gütefunktion betrachtet. Optimiert wird nun das 2. Intervall. Der Horizont geht vom 2. bis 5. Intervall. Wie zuvor wird jetzt wieder eine Simulation mit Schätzwerten vorgenommen, die anschließend optimiert werden.

Der Horizont verschiebt sich so lange, wie Zeitintervalle vorhanden sind. Vor dem Ende wird der Horizont kürzer, er besteht ab dem 16. Intervall nur noch aus den restlich vorhandenen Intervallen.

Die Rosenbrock-Optimierungen brauchen Abbruchbedingungen, nachdem sie ermittelte Werte für neue Aktorparameter nicht mehr weiter berechnen (Iteration beenden). Ohne Abbruchbe-

dingung würden numerische Verfahren so lange laufen wie es der gewählte Zahlenbereich des Datentyps der Programmiersprache zulässt. Die kleinste darstellbare Zahl ist im vorliegenden Fall mit  $1 \cdot 10^{-324}$  äußerst gering. Da das Optimierverfahren mit immer kleiner werdenden Variationen der Stellgrößen arbeitet, lässt sich hier eine Ansatzmöglichkeit für ein Abbruchkriterium finden. Der Abbruch soll geschehen, wenn die Werte der Stellgrößenveränderungen unterhalb von 1% liegen.

Vereinfacht werden hierfür während der Stellgrößenanpassung alle Elemente der Stellmatrix 'e(j)' miteinander multipliziert ( $\prod_{j=1}^N e_j$  mit  $N=8$ ). Wird der Betrag des Produktes kleiner als  $(0,01)^8 = 1 \cdot 10^{-16}$ , so kann man sagen, dass die Variation der Stellgrößen bei weiteren Iterationsschritten im Durchschnitt nicht mehr größer als 1% wird. Dies wird auch im Listing 6 gezeigt.

Listing 6: Funktionsaufruf zur Optimierung der Parameter

```
e_Produkt_End = 0.0000000001  '1 Prozent gesamt (keine Einzelbewertung)
e_Produkt = 1  'neutrales Element, da Produkt
For J = 1 To N
    var_x(J) = var_x(J) + e(I) * v(I, J)  'Stellgrößenanpassung
    e_Produkt = e_Produkt * Abs(e(J))
Next J
If e_Produkt < e_Produkt_End Then
    GoTo Ende
End If
```

Eine größere Genauigkeit ist nicht erforderlich. Zudem wird so der Rechenaufwand reduziert.

Da die Werte bei der Funktionsminimierung für den Rosenbrock-Algorithmus keine Aussagekraft haben, sondern nur Zahlen sind, werden auch Vorgabewerte für die Berechnung herangezogen, die physikalisch nicht möglich sind. Es muss also an anderer Stelle gewährleistet sein, dass die Optimierung nur bis zu der Schubvorgabe läuft, die für das Schiff maximal ist und dass nicht Rudervorgaben eingestellt werden, die Vielfache von  $|90^\circ|$  sind, da für eine Ruderstellung der Winkel nicht größer als + oder -  $90^\circ$  sein kann.

Zeit [Kurs	Vorschlag Ruder	Vorschlag x	Vorschlag y	Weg(Interval)	Resistivstecke	Vorschlag a	Simu x	Simu y	Simu Vorwärts-v	Quadrat x	Quadrat y	Quadrat W	optimiert a	Kompass-Kurs	Optimiert Ruder
1	41.82986179	83.47600096	60.05	91.4498207	13.78779911	339.6893117	6.893899555	47	87	0	170.3025	19.80090429	68.39518602	0	50.1
2	33.19589301	82.60133883	73.1	98.08572183	14.64027608	326.9662759	0.852476972	49	90	0.62466709	580.81	65.3788975	249.7697978	0	49
3	27.91639945	81.45784254	86.15	106.6466886	15.60755373	312.9483983	0.967277644	56	95	0.668022479	909.0225	135.6495472	345.3502464	0	46.5
4	24.50134147	79.90059183	99.2	116.8724261	16.57903877	298.5262684	0.871485041	62	100	0.712133468	1383.84	284.6787615	372.438221	0	43.8
5	22.21333975	77.65969856	112.25	128.5075595	17.47963033	283.1526066	0.900642163	69	106	0.750288019	1870.5625	506.3201821	345.4639393	0	40.8
6	20.66542938	74.17319611	125.3	141.2734342	18.25988174	268.8004991	0.780200815	76	112	0.774973132	2430.49	856.9339481	283.4027681	0	37.5
7	19.64373207	68.07372864	138.35	154.9272151	18.88725057	249.5256108	0.627968826	83	118	0.783345601	3063.6225	1363.619216	206.1024289	0	34
8	19.02750197	55.23980925	151.4	169.2020676	19.34099047	231.4384104	0.453739903	90	125	0.774566779	3769.96	1953.822777	127.0692119	0	30.3
9	18.7514949	21.68313767	164.45	183.8371567	19.60837408	212.6852477	0.267383606	97	132	0.749335365	4549.5025	2687.090815	60.09933124	0	26.5
10	18.76829237	-32.85161725	177.5	198.5716477	19.68267576	193.4356408	0.074301681	104	138	0.708920503	5402.25	3668.924505	15.30145656	0	22.7
11	19.14148613	-59.37271123	190.55	213.1447058	19.56211954	173.8735212	0.120556221	111	145	0.655290311	6328.2025	4643.700922	0.058315553	0	18.9
12	19.84654945	-69.89852435	203.6	227.295496	19.24960689	154.1908455	0.31251265	117	151	0.610663752	7499.56	5821.002714	21.59042183	0	15.2
13	20.91978882	-75.16590711	216.65	240.7631837	18.75316271	134.5824714	0.496444183	122	157	0.58756285	8958.6225	7016.270944	87.98043637	0	11.6
14	22.67962103	-78.27703394	229.7	253.286934	18.08720047	115.2414809	0.665962238	127	163	0.5683516286	10547.29	8151.730446	212.5653495	0	8.1
15	25.19147264	-80.31978314	242.75	264.605912	17.27488824	96.35423036	0.812312226	132	170	0.595905617	12265.5625	8950.278587	411.7438618	0	4.9
16	28.96399359	-81.76047165	255.8	274.459283	16.3521075	78.09434862	0.922780741	137	177	0.621579954	14113.44	9498.311841	737.882548	0	1.8
17	34.86465287	-82.82983984	268.85	282.5862121	15.37366179	60.61466769	0.978445713	141	185	0.65616636	16345.6225	9523.068792	20774.99829	0	35.9
18	44.66355008	-83.6545257	281.9	288.7258645	14.42212993	44.03562892	0.951531854	144	193	0.693732518	19016.41	9163.441138	17249.26308	0	35.6
19	61.80388903	-84.30963565	294.95	292.6174054	13.61787761	28.42807519	0.804252322	148	202	0.726663745	21594.3025	8211.514166	12587.96866	0	35.4
20	89.52816307	-84.84246773	308	294	13.12303577	13.78779911	0.494841843	150	212	0.744732203	24964	6724	6967.54756	0	35.3
											165763.375	89245.5391	61124.93112	0	

Abbildung 10: Tabelle mit Werten für die Anlegelinie und Steuerung des Schiffes

## 6 Programmfunktionalität und Tests

In diesem Teil soll das Programm getestet werden. Da kein Schiff zur Verfügung steht, wird dies nur theoretisch vorgenommen, also an SUSAN simuliert. Installationen beziehen sich auf die Praxis. Für die reine Simulation, auf die hier eingegangen werden soll, sind keine GPS-Empfänger erforderlich.

### 6.1 Tests zur Fehleroptimierung

Hier sollen die Ergebnisse der Optimierung betrachtet werden. Dabei werden auch Horizontgrößen angepasst.

Für einen plausiblen Vergleich wird für alle Testläufe der gleiche Start und das gleiche Ziel gewählt.

Zunächst werden keine Beschränkungen für die Stellgrößen gemacht. In dem Funktional lassen sich die Wertgruppen gewichten, so dass eine unterschiedliche Priosierung für den Optimierer möglich ist. Dazu werden für  $x$ ,  $y$ , Winkel, Ruder und Schub mit Koeffizienten (Vorfaktoren) multipliziert, die angepasst werden können, um die Optimierung zu verbessern. Die Anpassung dieser Größen wird in der Datei „Rosenbrock.bas“ im Funktional vorgenommen.

Zunächst stehen diese auf:

$$\text{Gew}_r = 1$$

$$\text{Gew}_a = 1$$

$$\text{Gew}_k = 1$$

$$\text{Gew}_x = 0.5$$

$$\text{Gew}_y = 0.5$$

$\text{Gew}_r$  steht für die Gewichtung der Rudergröße.  $\text{Gew}_a$  steht für Gewichtung des Schubes,  $\text{Gew}_k$  für den Kurs und  $\text{Gew}_x$  sowie  $\text{Gew}_y$  für die Position.

Mit der Variation dieser Werte lässt sich beobachten wie sich das Gütefunktional verhält. Dadurch lässt sich der Optimiervorgang verbessern.

Zuerst wird der Fall mit identischem Stell- und Beobachtungshorizont mit der Größe von 4 Sekunden untersucht, welcher über die 20 Sekunden des gesamten Anlegemanövers gleitet. In Abbildung 11 ist zu sehen, wie das Schiff vom Kurs abkommt, wenn als Vorgabe für Schub und



Abbildung 11: Simulation ohne Regelung

Ruder die Vorausberechnungen zu Grunde gelegt werden.

Wird jetzt eine Optimierung durchgeführt, fährt das Schiff anschließend näher an der Anlegelinie lang. Die Optimierung erforderte 13425 Schritte. Hierbei ist jedoch zu sehen, dass sich das Schiff rückwärts bewegt.

Der gelbe Balken am Heck des Schiffes stellt das Ruder dar (in SUSAN implementiert). An der Länge des Balkens ist die Schubvorgabe symbolisch zu erkennen.



Abbildung 12: geregelte Führung, Schiff fährt rückwärts

Damit sich das Schiff nicht mehr rückwärts bewegt, kann man die Gewichtung des Kurses nun von '1' auf '2' anpassen. Die Simulation mit der neuen Gewichtung erfordert nur noch 11462 Schritte.



Abbildung 13: Schiff fährt mit gutem Kurs, jedoch versetzt

Die neue Gewichtung hat die richtige Führung vorwärts zur Folge. Jedoch weicht das Schiff von den Sollkoordinaten stark ab. Als Folge soll nun mit Werten  $Gew_x = 1$  und  $Gew_y = 1$  eine erneute Simulation vorgenommen werden. Die Simulation mit der Positionsgewichtung mit jeweils '1' benötigt 15236 Schritte.

Hierbei lässt sich sehen (Abbildung 14), dass das Schiff nun zwar besser die Positionen anfährt, jedoch mit sehr hohem Schub um die Punkte herum kreist.

Dies liegt an der nicht vorhandenen Schubbegrenzung und der zu niedrigen Gewichtung des Schubes mit  $Gew_a$ . Im Folgenden soll nun der Beobachtungshorizont auf 10 erweitert werden. Ziel der Horizonterweiterung soll sein, dass Werte für Sollgrößen späterer Intervalle schon in die Berechnung aktueller Stellgrößen einfließen, um eventuell Optimierschritte der späteren Intervalle zu reduzieren.

Es lässt sich feststellen, dass mit 24349 Schritten wesentlich mehr Zeit benötigt wird als bei den zuvor durchgeführten Untersuchungen. Eine Verbesserung in der Wegführung hat der größere Beobachtungshorizont jedoch nicht zur Folge. Allerdings lässt sich erkennen, dass im Durchschnitt die Schubvorgaben geringer sind. Der Grund hierfür könnte sein, dass durch das vorausschau-



Abbildung 14: Schiff kreist um die Soll-Positionen

ende Fahren die Streckenpunkt zwischen Stellhorizont und Beobachtungshorizont an Bedeutung gewinnen.

Bei einem Beobachtungshorizont mit 20 Intervallen ohne gleitenden Stellhorizont stellt sich ein schlechteres Ergebnis dar. Der Stellhorizont wurde hierbei nur für die ersten 4 Intervalle verschoben. Die Suche des Kurses für  $\prod_{i=1}^8 e_i < 1e^{-16}$  benötigt 41636 Schritte. Das Schiff erreicht das Ziel jedoch nicht, da die Steuergrößen für den zweiten zu fahrenden Bogen nicht korrekt sind. Diese wurden schließlich nicht angepasst. Dies zeigt, dass die Horizontverschiebung grundsätzlich bis zum Ende der Anlegelinie durchgeführt werden muss.

Bei den Tests der GPS-Empfänger lässt sich feststellen, dass die gemessene Position mehrfach pro Minute im Bereich eines Kreises mit dem Durchmesser von ca. 50 m springt. Die GPS-Empfänger wurden jedoch zwischen hoher Bebauung getestet. Der Grund für die Variation in den Messdaten kann die Folge der Mehrwegeausbreitung und den damit verbundenen Reflexionen der Satellitensignale sein.

## 6.2 Benutzung des Programms

In diesem Abschnitt wird erklärt, wie die Software verwendet wird.

### 6.2.1 Bedienung und Umgang mit dem Programm

In einer Initialisierungs-Datei („*vbyacht.ini*“) sind die verwendeten seriellen Schnittstellen eingetragen. Hierin steht zuerst die Schnittstelle des Empfängers am Heck, darunter die Schnittstelle des Empfängers am Bug des Schiffes. Diese dürfen nicht vertauscht werden, da sonst das Schiff in der Software um 180° gedreht dargestellt wird.

In der Ini-Datei ist außerdem der Dateiname der referenzierten Karte einzutragen.

Nach dem Hardware-Aufbau und der Überprüfung der Initialisierungs-Datei kann der Navigationsassistent gestartet werden. Die Karte wird mit dem Programmstart automatisch geladen. Sollte sich die Karte nicht öffnen lassen, kommt es zu einer Fehlermeldung.

Der GPS-Empfang wird anschließend per Druck auf den Button „GPS-Empfang starten“ aktiviert. Zwei Punkte für Positionen der GPS-Empfänger sollten nun sichtbar werden. Die Punkte sind durch eine Linie miteinander verbunden, welche im Idealfall genau der Grundlinie der Yacht entspricht.

Als nächster Schritt ist die Position des Schiffes aus Sicht des Steuermanns auf der Karte zu bestimmen. Dies wird in zwei Schritten vorgenommen. Zunächst ist eine grobe Positionierung per Maus vorzunehmen. Hierzu wird ein Strich in die Karte mit der linken Maustaste gezeichnet. Wichtig hierbei ist, dass die Maus von der Bugposition zur Heckposition zu ziehen ist (siehe Abbildung 15). Die Schiffsmittle befindet sich auch auf der Mitte der Linie. Wird der Mauszeiger losgelassen, ist die Position erfasst und die Koordinaten sowie die Lagerichtung (Kurs) werden angezeigt.

Danach können die Daten mit den Pfeiltasten nachjustiert werden.

Wird anschließend der Button „Schiffsposition übernehmen“ geklickt, werden die Daten abgespeichert, die Differenz zu dem Mittelpunkt zwischen den GPS-Empfängern berechnet und das Schiff angezeigt. Dieser aus Länge und Winkel bestehende Datensatz bleibt, wie schon erwähnt, für die gesamte Navigationsphase bestehen.

Als nächster Schritt wird der Zielpunkt festgelegt. Dies wird auch in zwei Schritten vorgenommen. Zuerst ist eine grobe Zielbestimmung analog zur Schiffspositionierung per Maus vorzunehmen.

Wenn die Maustaste losgelassen wird, ist die Position festgelegt, und die Koordinaten sowie der

Kurs werden angezeigt. Die Daten können nun mit den Pfeiltasten nachjustiert werden.

Wenn nun die Zieldaten übernommen werden, errechnet der Rechner die zu fahrende Route und dafür notwendige geschätzte Steuereingriffe. Auf dem Display wird der Polynomzug durch Punkte angedeutet. Die Simulation wird per „Simulation starten“ gestartet. Das Schiff fährt nach den vorgegebenen Daten.

Für die Optimierung müssen folgende Schritte vorgenommen werden:

Das Schiff muss zunächst an seiner Ausgangsposition stehen, und das Ziel und die dazugehörige Anlegelinie mit den Vorgaben für Ruder und Schub müssen berechnet sein.

Wird nun der Button „Optimierung starten“ gedrückt, werden die Vorgaben für die ersten 4 Sekunden (dies entspricht der Horizontgröße) dem Optimierer übergeben, der anschließend die Vorgaben so anpasst, dass mit ihnen entlang der Anlegelinie gefahren wird.

Am Ende des Optimiervorgangs befinden sich die neuen Vorgabewerte in der Tabelle. Wenn das Schiff zurückgesetzt wird, kann mit den neuen Werten eine neue Simulation durchgeführt werden.

### 6.3 Mögliche Fehlweisungen

Die Kursumsetzung erfolgt in wenigen Fällen nicht optimal. Wenn zu Anfang oder zum Ende der Anlegelinie große Kursänderungen (Winkel von mehr als  $60^\circ$ ) erforderlich sind, kann es sein, dass das Schiff in der Simulation sein Ziel verfehlt, da die Rudervorgabe nicht so schnell umgesetzt werden kann. Die Schiffsdynamik von SUSAN ist wie bei einem richtigen Schiff beschränkt.

Dies liegt an der Beschränkung auf ein kubisches Polynom. Teilt man die Anlegelinie in einzelne Teilpolynome auf, sollte dieses Problem nicht auftauchen. Dies kann jedoch zur Folge haben, dass nun mehrere Kursänderungen, das heißt mehr Ruderbewegungen als notwendig erfolgen, auch wenn das Schiff auf einer Linie fahren soll.

## 7 Fazit

Zielsetzung dieser Diplomarbeit war, ein Assistenzsystem zu entwickeln, welches einen Steuermann beim Anlegemanöver mit einer Yacht im Hafen unterstützt. Im Verlauf der Arbeit stellte sich anhand der durchgeführten Optimierungen der Anforderung an das System und der anschließenden Simulation anhand des Schiffsmodells SUSAN heraus, dass es möglich ist, ein entsprechendes Assistenzsystem zu realisieren.

Die Optimierungsschritte dauern im Verhältnis zur Fahrzeit des Schiffes jedoch teilweise lange. Es lässt sich eine schnellere Optimierung durchführen, wenn man gute Startvorgaben wählt. Dies lässt sich durch eine effizientere Vorausberechnung der Näherungswerte durchführen, die eventuell anhand von Untersuchungen mit einem Schiff in der Praxis gemacht werden können. Eine Optimierung bei längerem Beobachtungshorizont ist effizienter, da die Schubvorgaben der einzelnen Intervalle nicht so stark variieren. Sie dauert jedoch länger als wenn der Suchhorizont und der Stellhorizont identisch sind. Die Optimierung ist zwar nicht stark zeitkritisch, es muss aber sichergestellt sein, dass sie abgeschlossen ist, wenn das Ruder, bzw. der Motor neue Stellgrößen fordern.

Die Messung der Position per GPS ist bei hoher Bebauung nicht akzeptabel, da der GPS-Empfang durch Mehrwegeausbreitung gestört wird und somit die Position oft fluktuiert. Diese Probleme dürfen nicht auftreten, sind aber auch in der Praxis eher nicht anzutreffen, da eine hohe Bebauung in Yachthafengebieten unwahrscheinlich ist.

### 7.1 Empfehlungen

Bei der GPS-Messung in der Praxis sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die gemessene Position vor der Referenzierung keinen starken Schwankungen ausgesetzt ist. Es sollte auch noch weiter untersucht werden, wie lange die gemessene und referenzierte Position vertrauenswürdig ist und wann eine Neureferenzierung getätigt werden muss. Des Weiteren kann, wie im Hauptteil erwähnt (Kapitel 4.1), die Möglichkeit untersucht werden, ob es sinnvoll ist, bestimmte Satelliten für die Positionsberechnung auszuschließen.

Die Rosenbrock-Optimierung kann verbessert werden, indem man die Gewichtung der einzelnen Einflussgrößen im Funktional so wählt, dass die Anzahl der Iterationsschritte gering bleibt. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass nicht unökonomische Werte für Ruder und Schub

vorgegeben werden.

Ebenfalls ist zu bedenken, dass für die Realität andere Gewichtungen als bei dem Schiffsmodell erforderlich sind. Diese müssen durch empirische Untersuchungen, wie sich das Schiff genau verhält, ermittelt werden.

Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass diese Diplomarbeit das entwickelte Assistenzsystem nur an einer Simulation betrachtet. Auf dem Schiff wird sich zeigen, inwiefern Parameter für die Realität angepasst werden müssen, um ein praxistaugliches Ergebnis zu liefern. Somit können keine konkreten Werte für die einzelnen Gewichtungen festgelegt werden. Es kann aber gesagt werden, dass die Gewichtung des Kurses und der Geschwindigkeit auch einen hohen Einfluss auf die angestrebten Polynom-Punkte hat. Ist die Gewichtung hoch, können die gewünschten Wegepunkte mit weniger Iterationsschritten erreicht werden.

Das Ergebnis des anhand des Schiffsmodells SUSAN durchgeführten Versuchs ist in jedem Fall zufrieden stellend und damit tauglich, in der Praxis erprobt zu werden.

## 7.2 Mögliche Erweiterungen

Sollte sich das vorliegende Assistenzsystem zum Manövrieren von Yachten in der Realität beweisen, könnte es mit folgenden Erweiterungen ausgestattet werden:

Um die Situation auch bei schlechter Sicht zu verbessern, müsste die Eingabe der Referenzposition automatisiert erfolgen. Dies könnte evtl. per DGPS gemacht werden oder durch eine Lichtschranke geschehen, durch die das Schiff beim Eintritt in den Hafen hindurchfährt. Verschiedene Möglichkeiten ortsfeste Gegenstände anzupeilen und damit die Position zu korrigieren, sollten auch in Erwägung gezogen werden.

Mit einem Drehwinkelgeber oder einem digitalen Kompass ließe sich die Kursabweichung präziser bestimmen. Auch sollte die Messung von Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen in Betracht gezogen werden. Wenn es erforderlich ist, könnten Wind- und Wellenbewegungen in die Simulation mit einbezogen werden. Dies kann erreicht werden, indem zufälliges Rauschen als Störgröße während der Simulation auf die Variablen für Geschwindigkeit und Kurs addiert wird. Somit ließe sich der, in der Realität vorhandene, Abdrift simulieren und könnte Schlussfolgerungen für das Optimierverfahren liefern.

Das System sollte mit einer Datenbank von Liegeplätzen im Hafen ausgestattet werden. Der

---

gewünschte freie Liegeplatz könnte einfach ausgewählt und angefahren werden. Die Datenbank sollte auch mit Daten der Liegeplatzgrößen ausgestattet sein. So wäre sichergestellt, dass der Liegeplatz für die Yacht die geeignete Größe hat.

Statt auf einem Computer könnte die Software in einem System mit externen Displays und speziellen Bedienelementen laufen. Dies erleichtert den Umgang mit dem System, wäre aber nur eine Erweiterung, die lediglich Auswirkungen für die Handhabung hat und nicht das System generell erweitert.

Um die Sicherheit des Systems, welches durchaus als kompletter Autopilot arbeiten kann, zu gewährleisten, müssen Hindernisse im Wasser gesichtet werden und deren Position in den Navigationskurs einfließen, so dass diese umfahren werden.

Versuchsreihen, die dieses entwickelte Assistenzsystem in die Realität umsetzen, könnten im Rahmen einer weiteren Studien- oder Diplomarbeit durchgeführt werden.

## 8 Anhang

Der Anhang dieser Diplomarbeit besteht aus dem entwickelten Programmcode sowie der fertigen Software. Beides ist auf der beiliegenden CD enthalten. Außerdem befinden sich im Anhang Bilder von der Programmoberfläche und von dem Programm in Benutzung.

### 8.1 Bilder

In diesem Abschnitt befinden sich Bilder des Assistenten (screenshots).

In der Abbildung 15 befindet sich das Programm im Ausgangszustand. Es wurde noch keine Start- und Zielvorgabe vorgenommen. Abbildung 16 zeigt den Assistenten mit festgelegter

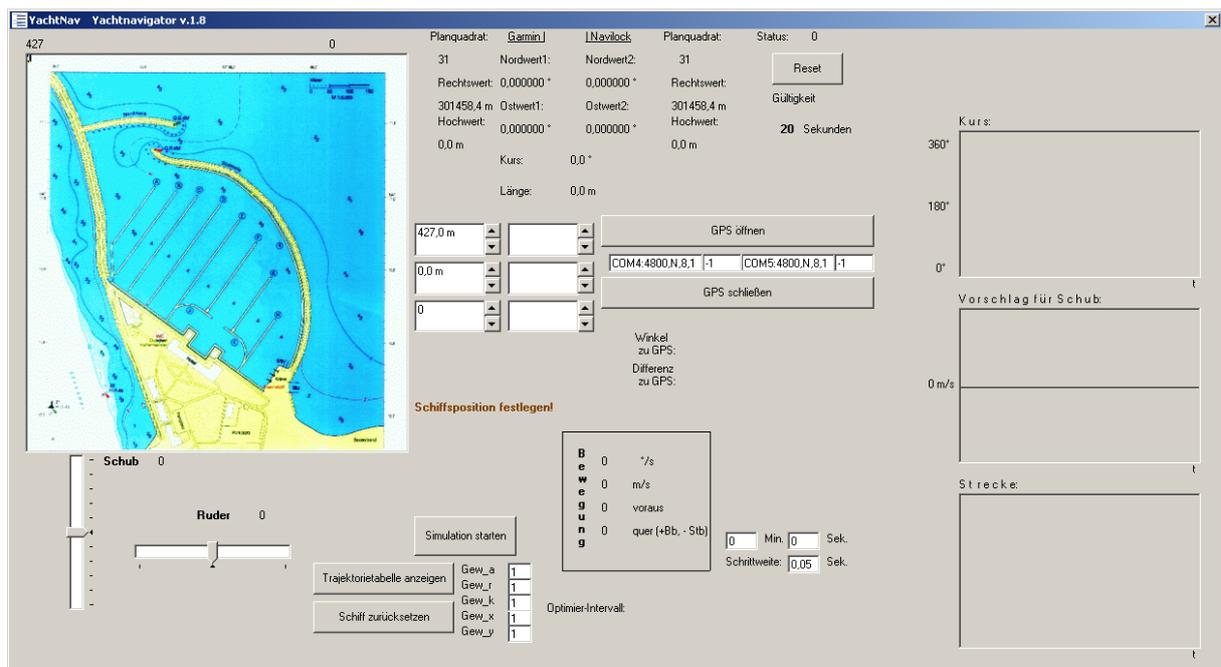


Abbildung 15: Programm im Anfangszustand

Start- und Zielposition.

### 8.2 Inhalt der beiliegenden CD-ROM

Der Programmcode und das Programm sowie die vorliegende Diplomarbeit im PDF-Format befinden sich auf der beiliegenden CD-ROM.

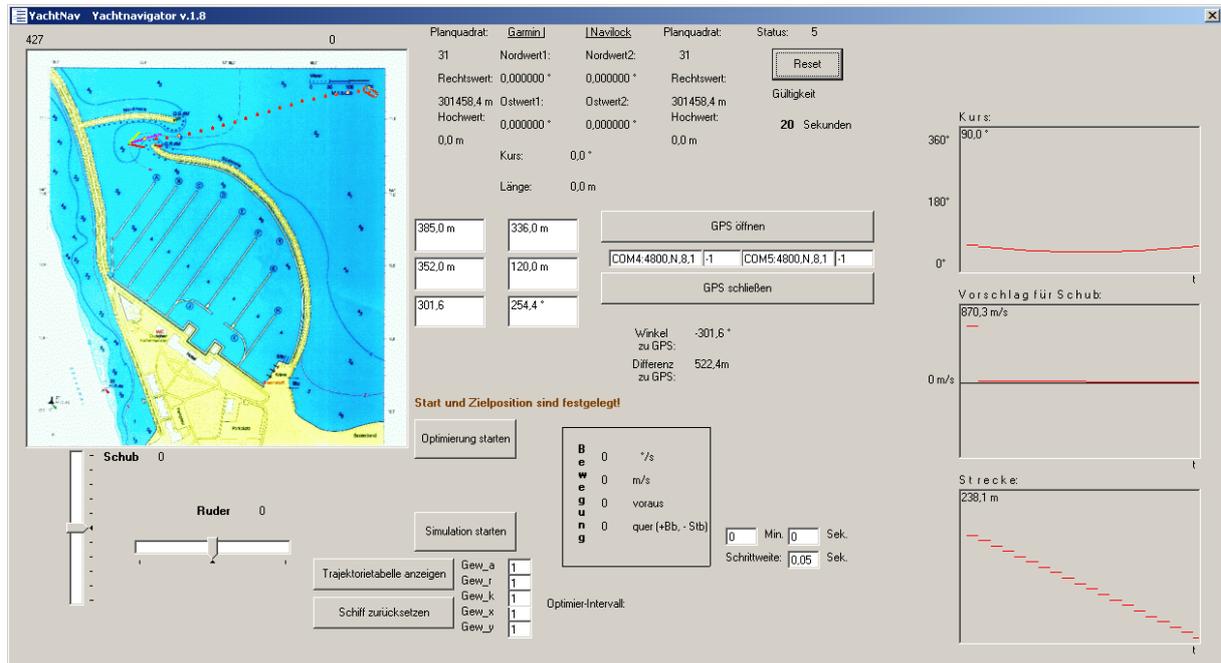


Abbildung 16: Start und Ziel festgelegt

### 8.2.1 Programmcode

Im Unterverzeichnis \Programmcode befindet sich der entwickelte Quellcode in der Version 1.8 vom 16.12.2007 für das entwickelte Assistenzsystem. Der Quellcode ist in der Visual Basic Version 6 entstanden. Er besteht aus folgenden Dateien:

Modul\_Integration.bas

Modul\_Systemmodell.bas

Modul\_Variablendeklaration.bas

Modul\_kurslaenge.bas

Modul\_Anfangswerte.bas

Modul\_GPS2.bas

Modul\_Schiffsposition.bas

Module\_koortrans.bas

Modul\_Main.bas

Modul\_Tools.bas

Modul\_Rosenbrock.bas

---

Modul\_Streckenpolynom.bas  
Modul\_Zeichnen.bas  
Modul\_Trajektorie.bas  
ComPort.bas  
VByacht.vbp  
Tabelle.frm  
Oberfläche.frm

Die Datei `VByacht.vbp` bezeichnet die Projektdatei. Mit ihr öffnen sich in Visual-Basic alle dazugehörigen Dateien. Die Datei `Oberfläche.frm` enthält die Beschreibung der grafischen Benutzeroberfläche, während die Datei `Tabelle.frm` die notwendigen Informationen für die Erzeugung der Trajektorietabelle enthält.

Die 14 \*.bas-Dateien enthalten den Algorithmus zur Funktion des Programms. Die Funktion einiger Dateien wurde im Kapitel 5.4 beschrieben.

Der Quellcode ist kommentiert, so dass sich leicht nachvollziehen lässt, was in der entsprechenden Codezeile geschieht oder welche Funktion ein spezielles Modul hat.

### 8.2.2 Programm

Im Unterverzeichnis `\Programm` befindet sich die ausführbare Datei `YachtNav.exe`.

Das Programm wurde unter dem Betriebssystem Windows XP programmiert und getestet. Die Funktionalität auf anderen Windows-Betriebssystemen ist jedoch auch gewährleistet. Zusätzlich zu der ausführbaren Datei befinden sich hier noch für die Ausführung notwendige Dateien, sowie die Ini-Datei und der beispielhafte Hafenplan aus der Aufgabenstellung.

## 9 Glossar

**Almanach:** Sammlung von astronomischen Daten, insbesondere Daten über den Satelliten, der diese Informationen aussendet.

**Codemultiplex:** Verfahren, bei der die Daten unterschiedlicher Sender gleicher Frequenz durch einen Code zu unterscheiden und zuordbar sind.

**COM-Port:** serielle Computerschnittstelle, hier nach RS-232-Standard; dient zum Anschluss externer Geräte an einen Computer

**common-mode-Fehler:** Fehlerquelle bei der Signallaufzeitberechnung (Fehler durch Satellit oder Satellitenposition) : Ionosphärenfehler, Troposphärenfehler, Ephemeridenfehler, Satellitenuhrenfehler.

**Ellipsoid:** Körper, der bei der Rotation um die Achse einer Ellipse entsteht, wie die Kugel aus der Rotation eines Kreises entsteht.

**Ephimeride:** Daten der Umlaufbahn auf der sich der jeweilige Satellit befindet.

**ETRS-89:** Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989, einheitliches Referenzsystem für die Geodateninfrastruktur in Deutschland und Europa zu Vermessungszwecken.

**Frequenzmultiplex:** Aufteilung der zur Verfügung stehenden Bandbreite in Frequenzbänder (wie beim UKW-Rundfunk) um Signalquellen im Empfänger voneinander zu unterscheiden; jeder Sender sendet mit seiner eigenen Frequenz.

**Geoid:** der von der tatsächlichen Erdgestalt abweichende theoretische Körper, dessen Oberfläche die Feldlinien der Schwerkraft überall im rechten Winkel schneidet.

**Ionosphäre:** höchste Atmosphärenschicht, ab 80 km von der Erde entfernt

**Kalman-Filter:** Algorithmus zur Gewinnung von Nutzinformationen aus stochastischen Signalen, welche stark verrauscht sein können (nach Rudolf Emil Kálmán (\*1930)).

**model predictive control:** Verfahren auf Grundlage eines Modells zur Regelung von Prozessen; hierbei werden die Eingangssignale berechnet, in dem ein Gütekriterium betrachtet wird und

die Eingangssignale fortwährend angepasst werden, so dass sich die gewünschte Güte einstellt.

**non-common-mode-Fehler:** Fehlerquelle bei der Signallaufzeitberechnung (Fehler durch Empfänger oder der Position des Empfängers): Mehrwegeausbreitung, Empfängeruhrenfehler, Empfängerrauschen.

**Standard Positioning Service:** kostenloser GPS-Dienst für die zivile Anwendung über den C/A-Code.

**Troposphäre:** niedrigste Atmosphärenschicht, vom Erdboden bis zu einer Höhe von ca. 15 km entfernt

**World Geodetic System 1984 (WGS-84):** Ein geodätisches Bezugssystem, zu dem unter anderem ein Geodätisches Datum gehört. Die Koordinaten der GPS-Satelliten sind Koordinaten im Geodätischen Datum des WGS-84.

## 10 Abkürzungsverzeichnis

BPSK	Binary Phase Shift Keying
C/A-Code	Coarse/Acquisition-Code
CDMA	Code Division Multiple Access
DGPS	Differential GPS
ETRS 89	European Terrestrial Reference System 1989
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	global positioning system
L-Band	Frequenzband zwischen 600 MHz und 1600 MHz
LHCP	left hand circular polarisation
MPC	model predictive control
NMEA	national marine electronics association
P/Y-Code	Precision/Encrypted-Code
RHCP	right hand circular polarisation
SAPOS®	Satellitenpositionierungsdienst
SPS	Standard Positioning Service
UTM	Universal Transverse Mercator

## Abbildungsverzeichnis

1	Hafenkarte . . . . .	7
2	Bei BPSK wird die Phase einer Trägerschwingung je nach Bit (0 oder 1) geändert.	11
3	Unterrahmen der GPS-Information [Bau] . . . . .	12
4	Störung eines ungespreizten und gespreizten Spektrums . . . . .	13
5	Kartesische Koordinatensysteme (Quelle: Landesvermessungsamt Sachsen) . . . . .	21
6	links: Garmin GPS35-HVS, rechts: Navilock NL-302U . . . . .	31
7	Schiff muss in entgegengesetzte Richtung drehen . . . . .	40
8	Schiff im gedrehten Koordinatensystem . . . . .	41
9	Schema der Modell-prädiktiven-Regelung . . . . .	47
10	Tabelle mit Werten für die Anlegelinie und Steuerung des Schiffes . . . . .	54
11	Simulation ohne Regelung . . . . .	56
12	geregelte Führung, Schiff fährt rückwärts . . . . .	56
13	Schiff fährt mit gutem Kurs, jedoch versetzt . . . . .	57
14	Schiff kreist um die Soll-Positionen . . . . .	58
15	Programm im Anfangszustand . . . . .	64
16	Start und Ziel festgelegt . . . . .	65

## Tabellenverzeichnis

1	GPS-Trägerfrequenzen . . . . .	11
2	SAPOS-Dienste . . . . .	24
3	voreingestellte SUSAN-Schiffsparameter . . . . .	28

## Literatur

- [Bac] **Peter Bachmann.** *Handbuch der Satelliten-Navigation.* Motorbuch Verlag, 1993.
- [Bau] **Manfred Bauer.** *Vermessung und Ortung mit Satelliten,* S. 123–125. Wichmann Verlag, 5. Auflage, 2003.
- [Dit] **Stefan A. Dittrich.** *Visual Basic 5. Programmier Technik und Lösungen.* Franzis Verlag GmbH, 1997.
- [Rab] **Ahmed El-Rabbany.** *Introduction to GPS.* Artech House Publishers, 2002.
- [Gor] **Dieter Görrisch.** *GPS im Selbstbau.* Franzis Verlag, 2003.
- [Hur] **Karlheinz Hurraß.** *Erprobung eines GPS-Empfängers.* Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V., 1988.
- [Kuc] **Horst Kuchling.** *Taschenbuch der Physik.* Fachbuchverlag Leipzig, 2004.
- [Kum] **Werner Kumm.** *GPS Global Positioning System.* Delius Klasing, 1993.
- [Man] **Werner Mansfeld.** *Satellitenortung und Navigation.* Vieweg Verlag, 1998.
- [Ros] **H.H. Rosenbrock.** *An automatic method for finding the greatest or least value of a function,* S. 175–184. Computer Journal, 1960.
- [Sch] **Bobby Schenk.** *Navigation nur zum Ankommen.* Delius Klasing, 1992.
- [ScY] **Bobby Schenk.** *Yachtnavigation.* Delius Klasing, 1993.
- [Tha] **Georg Erwin Thaller.** *Satelliten im Erdorbit.* Franzis Verlag, 1999.
- [Wen] **Jan Wendel.** *Integrierte Navigationssysteme.* Oldenbourg Verlag, 2007.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §24(4) bzw. §25(4) ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 17. Dezember 2007