

Bestimmung von Position und Orientierung des Eigenschiffes mittels Korrelation von AIS-und Radar-Informationen

Jannik Knopp

Abstract

lore ipsum

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Abgrenzung	2
1.4 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	3
2.1 Allgemeines	3
2.1.1 NMEA 0183	3
2.1.2 WGS 84	4
2.1.3 Berechnungen auf dem Erdellipsoid	4
2.2 Point Set Registration	5
2.2.1 Rigid und Non-rigid Registration	5
2.2.2 Stochastisches Point Set Registration	5
2.2.3 Gaussian Mixture Model	5
2.2.4 EM-Algorithmus	6
2.2.5 Singulärwertzerlegung	6
2.2.6 Coherent Point Drift	6
3 Literaturvergleich	7
3.1 Fusion von AIS- und ARPA-Signalen	7
3.2 Point Set Registration Methoden	7
3.3 Position Fix Methoden / Sicherheitssteigerung der Positionsbestimmung	7
4 Umsetzung	8
4.1 Ansätze	8
4.1.1 Iterative Closest Point	8
4.1.2 Subgraph Matching	9
4.1.3 Coherent Point Drift	9
4.2 Implementierung	10

4.2.1	Programmablauf	10
4.2.2	Ungenauigkeiten durch den Erdellipsoid	12
4.2.3	Rotationsschwäche von Coherent Point Drift	14
4.3	Position-Fix	16
4.3.1	Bestimmung der Eigenposition	16
4.3.2	Bestimmung der Sicherheit der Eigenposition und Eliminierung von Ausreißern	18
4.3.3	Erstellung des Ergebnisses	20
5	Bewertung	21
5.1	Genauigkeit	21
5.2	Robustheit	21
5.3	Ausblick	21
6	Schluss	22
6.1	Zusammenfassung	22

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Eigenposition eines Schiffes gehört zu den wichtigsten navigatorischen Daten. Diese wird meistens über einen GPS-Empfänger bestimmt. Das GPS-Signal ist manipulierbar, somit besteht die Möglichkeit einer böswilligen Manipulation durch einen Angreifer. Dadurch fällt der GPS-Empfänger aus oder gibt eine falsche Position zurück. In diesen Fällen ist die Eigenposition nicht mehr verfügbar oder nicht vertrauenswürdig, somit ist es notwendig eine Methode zur Positionsbestimmung zu entwickeln, welche unabhängig von dem eigenen GPS-Empfänger arbeitet und somit in der Lage ist dessen Daten zu verifizieren.

Zur Bestimmung der Eigenposition können die Daten aus dem Radar, die GPS-Daten der Schiffe in unmittelbarer Nähe (über AIS bekannt) und die Daten der Seekarte genutzt werden. Das Automatic Identification System (AIS) ist ein unverschlüsseltes Funksystem, zum Austausch von Schiffs- und Navigationsdaten. Durch die AIS-Daten ist die absolute Position von Schiffen und ATONs (*Aid to navigation*) bekannt. ATONs sind markante Landmarken oder Bojen zur Unterstützung der Navigation. Durch das Radar erhält man die relative Position der Schiffe und der ATONs zu der Eigenposition. Durch diese beiden Daten lässt sich ein Rückschluss auf die Eigenposition ziehen. Die Zuordnung zwischen AIS- und Radar-Signalen ist aktuell abhängig von der Eigenposition. Da diese bestimmt werden soll, muss ein Algorithmus entwickelt werden, welcher unabhängig von dieser die Zuordnung finden kann. Durch das Finden einer Zuordnung findet sich auch die Transformation, die beide Punktwolken unterscheidet.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Thesis ist die Entwicklung eines Algorithmus, welcher die Eigenposition und den Kurs (Heading) des Eigenschiffes möglichst genau bestimmen kann. Dieser soll unabhängig der eigenen GPS-Daten funktionieren. Der Algorithmus soll später als eine Art Sensor für die Brücke eingesetzt werden, das heißt die Brücke sendet die benötigten Daten an den Algorithmus und dieser sendet die errechnete Eigenposition und eine Darstellung zurück an die Seekarte.

1.3 Abgrenzung

Das Produkt der Thesis ist ein externes Softwaremodul, welches in Zusammenarbeit mit Herrn André Becker entwickelt wird. Dieser verfasst ebenfalls seine Thesis über einen Teil dieses Softwaremoduls. Die Thesen lassen sich wie folgt abgrenzen, Herr Becker entwickelt einen Teil der Vorfilterung der Daten, einen Point-Matching Algorithmus und eine Netzwerkschnittstelle zur Kommunikation des Softwaremoduls mit der Schiffsbrücke. Diese Thesis umfasst einen weiteren Teil der Vorfilterung der Daten, ebenfalls einen Point-Matching Algorithmus und einen Algorithmus zur Positionsbestimmung. Das Einlesen der Daten wird über einen Daten Parser realisiert, welcher von Raytheon Anschütz gestellt wurde und somit nicht Teil der Thesis ist. Ebenso wird die Funktionalität über Daten aus einem Daten Generator verifiziert, welcher ebenfalls von Raytheon Anschütz gestellt wurde.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die folgende Arbeit behandelt in Kapitel 2 wichtige Grundlagen die benötigt werden, um im weiteren die Problemstellungen und die Algorithmen zu verstehen. Das dritte Kapitel zeigt andere Ansätze aus der Literatur zu diesem Thema und wie diese zur aktuellen Arbeit in Verbindung stehen. In Kapitel 4 werden verschiedene Ansätze und die Umsetzung beschrieben. Danach wird in Kapitel 5 das erarbeitete Ergebnis bewertet und es wird ein Ausblick über mögliche Optimierungen gegeben.

2. Grundlagen

2.1 Allgemeines

.

2.1.1 NMEA 0183

Der NMEA 0183 ist ein Standard zur Kommunikation zwischen Geräten auf einer Schiffsbrücke. Dieser wurde von der National Marine Electronics Association 1983 veröffentlicht. In diesem ist unter anderem die Struktur der Nachrichten definiert.

Die Nachrichten, welche über NMEA gesendet werden enthalten z.B. Daten von Systemen auf dem Schiff wie dem Radar, Daten von Sensoren wie Kompass und GPS-Empfängern. Hier rüber werden auch zusätzlich AIS-Nachrichten empfangen aus der nahen Umgebung

Eine solche NMEA - Nachricht ist wie folgt aufgebaut:

Sie beginnt mit einem „!“ oder einem „\$“ als Startzeichen. Darauf folgen zwei Zeichen Geräte ID, dadurch ist erkennbar woher die gesendeten Daten kommen. Auf die Geräte ID folgen drei Zeichen die den Nachrichtentyp bezeichnen, an welchen auch die folgenden Datenfelder zu identifizieren sind. Nun folgen die Datenfelder, welche für jeden Nachrichtentyp spezifisch sind. Am Ende der Nachricht folgt eine optionale Prüfzahl, welche mit einem „*“ abgetrennt wird. Die Nachricht wird mit einem Zeilenumbruch beendet.

Im folgenden beschreibt Abbildung 2.1 eine Tracked Target Management (TTM) NMEA - Nachricht. Dieser Nachrichtentyp enthält Schiffe aus dem Radar die als solche erkannt wurden und nun kontinuierlich über das Radar verfolgt werden.

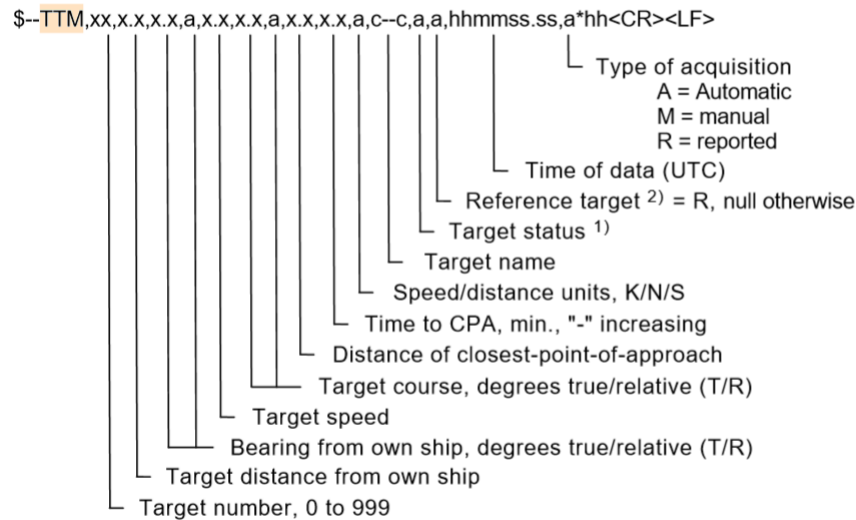


Abbildung 2.1: TTM Telegramm (NMEA Nachricht)

2.1.2 WGS 84

Das World Geodetic System 1984 (WGS 84) ist ein einheitliches System zur Positionsbestimmung auf dem Erdellipsoid. Es basiert auf einem Referenzellipsoiden.

Dieser Referenzellipsoid ist wie folgt parametrisiert:

Semi Major Axis $a = 6.378.137m$

Semi Minor Axis $b = 6.356.752m$

Erdabplattung: $f = \frac{(a-b)}{a}$

Somit sind globale Positionsangaben in Längen- und Breitengrad möglich. Die Längengrade verlaufen zwischen den Nord- und Südpol, die Breitengrade verlaufen parallel zum Äquator. Dadurch sinkt die Distanz zwischen benachbarten Längengraden je näher sie einem Pol kommen. Die Längen- und Breitengrade werden in der Grad angegeben. Bei genaueren Positionsangaben werden zusätzlich die Gradminuten und Gradsekunden angegeben.

Das WGS 84 wird in GPS Empfängern verwendet und ist somit ein essentielles System zur Positionsbestimmung in der Schifffahrt.

2.1.3 Berechnungen auf dem Erdellipsoid

Es existieren verschiedene Formeln zur Berechnung auf dem Erdellipsoid. Für diese Arbeit sind besonders Formeln wichtig, welche die erste und zweite geodätische Hauptaufgabe lösen können. Die erste geodätische Hauptaufgabe ist das bestimmen eines Punktes mit einem gegebenen Punkt, einer Richtung und der Distanz. Die zweite geodätische Hauptaufgabe ist das bestimmen von Richtung und Distanz zwischen zwei Punkten. Zur Lösung der ersten beiden geodätischen Hauptaufgaben werden im weiteren drei Möglichkeiten dargestellt und bewertet.

Die erste Möglichkeit ist die Berechnung über die Euklidische Norm. Dabei würde man die Koordinaten auf einer Ebene annehmen und dementsprechend berechnen. Der Vorteil hiervon ist, dass wenn die Entfernungen zwischen den Punkten nicht zu groß werden, der Fehler durch die Erdkrümmung nur sehr klein ist. Zusätzlich ist die Berechnung so natürlich sehr simpel und effizient ausführbar. Die Berechnung über diesen Weg ist nur ratsam bis die Distanz $20km$ überschreitet. Denn ab diesem Punkt werden die Fehler durch die Erdkrümmung immer größer, wodurch auf komplexere Formeln mit erdähnlicheren Grundformen zurückzugreifen ist.

Die zweite mögliche Formel für die Berechnung ist die Great Circle Distance. Diese beruht auf der Annahme, dass die Erde eine perfekte Kugel ist und somit Distanzberechnungen auf einer Kugel möglich sind. Dies hat den Vorteil, dass der Fehler deutlich geringer bleibt als bei der Euklidischen Norm. Jedoch ist der Fehler für größere Distanzen immer noch zu groß, um die Formel in einem sicherheitskritischen Bereich zu verwenden.

Die dritte Möglichkeit ist die Vincenty Formel. Diese berechnet die geodätischen Hauptaufgaben auf einem Ellipsoiden. Dieser kann anhand der Erde parametrisiert werden. Das eröffnet die Möglichkeit Punkte über eine beliebige Distanz zu berechnen ohne eine Erhöhung des Fehlers durch die Erdkrümmung. Die Formel hat jedoch eine höhere Laufzeit als die vorherigen, da sie den Fehler der durch den Erdellipsoid entsteht bis zu einem Schwellwert minimiert. Die Formel soll egal wo auf der Erde eine Ungenauigkeit von weniger als einem Zentimeter haben.

Die genannten Beispiele können je nach Entfernung zwischen den Punkten gewählt werden. Die genaue Auswirkung, welche die Abweichungen haben ist in Abbildung ??? zusehen und in Tabelle mit Testdaten belegt.

2.2 Point Set Registration

2.2.1 Rigid und Non-rigid Registration

Unterschied zwischen Rigid und Non-rigid registration erklären und kurze Erwähnung der Probleme, welche bei Rigid Registration auftreten

2.2.2 Stochastisches Point Set Registration

Vergleich von Stochastischen Point Set Registration Methoden (basieren meist auf GMMs) und anderen Methoden z.B. Iterative Closest point

2.2.3 Gaussian Mixture Model

Erklärung von Gaussian Mixture Models im Zusammenhang mit Point Set Registration

2.2.4 EM-Algorithmus

Erklärung des EM Algorithmus und welchen nutzen er für Point Set Registration hat

2.2.5 Singulärwertzerlegung

Erklärung von Singulärwertzerlegung

2.2.6 Coherent Point Drift

Erklärung der Methodik des Coherent Point Drift Algorithmus und des mathematischen Hintergrunds anhand der letzten drei Punkte

3. Literaturvergleich

3.1 Fusion von AIS- und ARPA-Signalen

Es existieren mehrer Arbeiten zum Thema Fusion von Arpa und Ais Signalen, diese werden betrachtet und kurz bewertet wie sie zu dieser Aufgabenstellung passen

3.2 Point Set Registration Methoden

Mehrere Rigid Point Set Registration Methoden werden betrachtet.

3.3 Position Fix Methoden / Sicherheitssteigerung der Positionsbestimmung

Andere Ansätze zur Sicherstellung der Positionsdaten werden erklärt (Hier ist noch keine konkrete Literatur recherchiert kann sich deswegen noch ändern)

4. Umsetzung

4.1 Ansätze

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Ansätze behandelt, welche im Laufe der Arbeit evaluiert wurden. Zudem werden die Stärken und Schwächen der Ansätze zu denen des ausgewählten Algorithmus betrachtet und bewertet.

4.1.1 Iterative Closest Point

Der *Iterative Closest Point* Algorithmus (ICP) ist ein sehr bekannter und verbreiteter Algorithmus für *Rigid Registration*. Er funktioniert wie folgt:

Zuerst werden die Transformationsparameter so initialisiert, dass die beiden Punktwolken keine zu großen Unterschiede aufweisen. Danach werden die Transformationsparameter (Rotation, Translation und Skalierung) auf eine Punktwolke angewandt, sodass nun für jeden Punkt aus der transformierten Punktwolke der dichteste Punkt aus der fixen Punktwolke bestimmt werden kann. Wenn die Zuordnung bestimmt wurde, kann nun über die Summe der Abstandsqumate zwischen den Punkten ein Fehler zwischen den Punktwolken berechnet werden. Ist dieser Fehler klein genug ist die Registrierung abgeschlossen, ist er zu groß werden die Transformationsparameter anhand der gefundenen Zuordnung neu bestimmt und der Algorithmus wird iterativ wiederholt, bis er konvergiert.

ICP existiert schon recht lange, deswegen gibt es eine Vielzahl von Erweiterungen, wie z.B. EM-ICP, welches ICP durch den EM-Algorithmus erweitert. So existieren auch Varianten die ICP beschleunigen usw.

Der ICP Algorithmus ist auf Grund seiner einfachen Funktionsweise sehr performant und leicht zu verstehen. Außerdem lässt er sich wegen seines modularen Aufbaus sehr gut erweitern und verändern, was ihn gut anpassbar für viele Situationen macht. Er hat jedoch auch einige Nachteile, diese werden im folgenden erläutert. Die Punktwolken müssen initial bereits annähernd zueinander passen, da sonst nicht die optimale Lösung bestimmt werden kann. Außerdem sorgen fehlende Punkte in einer der Punktwolken für Probleme, da diese die Zuordnung verfälschen können und somit den berechneten Fehler.

Der ICP Algorithmus wurde aus folgenden Gründen nicht in dieser Arbeit verwendet:

1. Die Rotation zwischen den beiden Punktwolken kann beliebig sein und ist vorher nicht bestimmbar
2. Es können mehrere Punkte in den Punktwolken fehlen, da diese recht viele Punkte enthalten können
3. Die Zuordnung von Punkten ist eindeutig (0 oder 1), was das erkennen von Fehlern oder das bestimmen einer Vertrauenswürdigkeit sehr schwer macht

4.1.2 Subgraph Matching

Das Subgraph Matching ist ein weiterer Ansatz, um eine Zuordnung zwischen den Punktwolken wiederherzustellen. Hierfür würden die Punktwolken als zwei vollvermaschte Graphen betrachtet werden. Das Subgraph Matching auch Sub-Graph Isomorphismus Problem genannt basiert auf zwei gegebenen Graphen G und H , wobei gezeigt werden soll das G einen Subgraph isomorph zu H enthält. Die Eigenschaft isomorph bedeutet das eine Bijektion zwischen den Kanten von G und H existiert, sodass zwei benachbarte Kanten in G auch in H benachbarten Kanten entsprechen. Für dieses Problem existieren bereits Algorithmen, welche es für große Graphen lösen können.[Cordello 2004] [Bonnici 2013]

Die Stärke dieses Ansatzes ist die Genauigkeit, da das finden eines Subgraphs eine eindeutige Zuordnung zur Folge hätte, welche je nach Größe des Subgraphs auch als dementsprechend sicher einzustufen wäre. Zusätzlich kann sich so jede beliebige Rotation zwischen den Punktwolken finden lassen, da die Zuordnung nur auf den Abständen zwischen den Punkten basiert.

Jedoch hat dieser Ansatz eine gravierende Schwäche für die zu bearbeitende Problemstellung, welche auch für den Verwurf des Ansatzes sorgte.

Das Graph Matching kann mit Ausreißern nicht arbeiten, da es nicht fehlende Punkte erkennen kann und ein vollvermaschter Graph sich negativ auf die Laufzeit auswirkt. Die Ausreißer bei diesem Problem können in AIS- sowie ARPA-Punktwolken existieren. In der AIS-Punktwolke existieren mehr Punkte als in der ARPA-Punktwolke, weil AIS mehr Reichweite als das Radar hat und AIS geographisch nicht durch verschiedenen Höhen beschränkt ist wie das Radar. Außerdem kann die ARPA-Punktwolke auch Punkte enthalten die in der AIS-Punktwolke fehlen. Dies ist möglich falls ein Schiff kein AIS sendet oder Radarschatten fälschlich für Schiffe gehalten werden. Zusätzlich ist der Ansatz sehr Laufzeit intensiv, da die beiden Graphen zuerst erstellt werden müssen, wofür die Distanz zwischen allen Punkten berechnet werden muss.

4.1.3 Coherent Point Drift

Der in dieser Arbeit verwendete Algorithmus ist der Coherent Point Drift Algorithmus. Dieser wurde aus verschiedenen Punkten ausgewählt, welche im folgenden erläutert werden.

Der CPD kann mit verrauschten Daten arbeiten, da er eine *weiche* Zuordnung (Wert zwischen 0 und 1) berechnet anstatt einer eindeutigen Zuordnung wie der ICP Algorithmus. Durch diese *weiche* Zuordnung ist es auch möglich eine Aussage über die Vertrauenswürdigkeit eines Zuordnungspaares zu treffen. Dadurch könnte der errechnete Wert wie genau die Zuordnung gepasst hat, als Gewichtung genutzt werden.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von CPD ist, dass es möglich ist Ausreißer in den Punktwolken zu erkennen und diese keinem Punkt zuzuordnen. Dies war in ICP und Subgraph Matching noch ein Problem.

Zusätzlich kann der CPD auch eine Rotation der Punktwolke erkennen was essenziell für die Bestimmung des Headings des Schiffes ist (siehe Programmablauf).

Es existiert ein Problem mit diesem Ansatz. Der CPD kann keine beliebige Rotation erkennen, dieses Problem lässt sich jedoch in vielen Point Set Registration Algorithmen finden. Die Lösung dieses Problems wird in 4.2.3 genauer erklärt.

In der folgenden Tabelle 1.1???? ist die Entscheidungsfindung nochmal tabelliert. Zu erkennen sind die einzelnen Stärken der Ansätze und welche Eigenschaften fehlen, um das hier betrachtete Problem effektiv zu lösen. GRAFIK STATT TABELLE?

	ICP	Subgraph Matching	CPD
Rauschen	1	0	1
Rotation	0	1	0.5
Ausreißer	0	0	1
weiches Matching	0	0	1

Tabelle 4.1: Vor- und Nachteile der Ansätze

4.2 Implementierung

4.2.1 Programmablauf

Das entstandene Softwaremodul umfasst verschiedene Abläufe, welche zum besseren Verständnis erläutert werden.

In Abbildung 4.1 ist der Ablauf der Software anhand eines Aktivitätsdiagramms dargestellt, dieser wird im folgenden genauer erläutert.

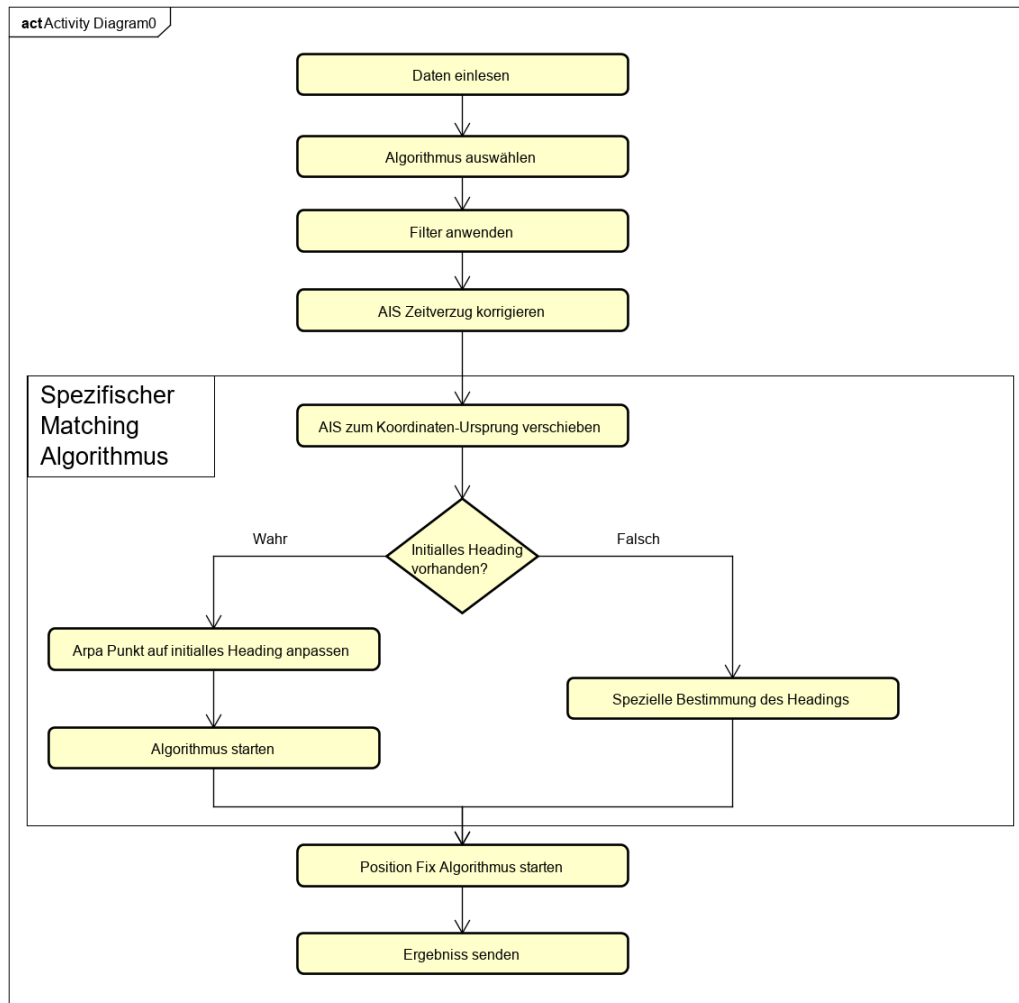


Abbildung 4.1: Aktivitätsdiagramm des Softwaremoduls

Zuerst werden die benötigten Daten von der Brücke als NMEA-Nachrichten eingelesen. Dies geschieht durch einen NMEA-Parser von Raytheon Anschütz, welcher in das Modul eingebunden ist.

Im folgenden wird ein Algorithmus ausgewählt, welcher passend zu den verfügbaren Daten den weiteren Ablauf bestimmt. Die folgenden Daten werden hier auf ihre Existenz geprüft:

1. AIS Daten umliegender Schiffe und AtoNs
2. Die Geschwindigkeit des eigenen Schiffes
3. Empfangene AIS-Daten von mindestens drei AtoNs

Anhand dieser Daten wird ein Algorithmus ausgewählt, welcher in der jeweiligen Situation das beste Ergebnis erzielt.

Der bestimmte Algorithmus gibt nun an, welche der drei Filter auf die Daten angewendet werden müssen, um die für den Algorithmus relevanten Daten zu extrahieren. Diese drei sind: das filtern nach den neuesten AIS und ARPA Daten der Schiffe, das filtern nach den AtoNs im AIS und das filtern nach ARPA Daten, welche keine Geschwindigkeit aufweisen.

Zusätzlich zu diesen drei Filtern werden die AIS-Daten mithilfe von Seekarten Informationen abgeglichen. Bei diesem Abgleich werden fehlende AtoNs im AIS durch AtoNs aus den Seekarten korrigiert. Dies ist möglich, da alle AtoNs in der Seekarte verzeichnet sind.

Nach der Anwendung der Filter auf die Daten, wird der Zeitverzug der AIS-Daten korrigiert. Dieser Zeitverzug existiert, da AIS-Nachrichten in einer Frequenz zwischen 3s bis 2min gesendet werden können. Die Sendezeit ist abhängig von der Geschwindigkeit und der Kursänderung des Schiffes. Die Radar Antenne, welche für die ARPA-Daten zuständig ist benötigt jedoch für eine volle Umdrehung bzw. für das erfassen aller umliegenden Schiffe nur ca. 2s bis 4s. Dieser zeitliche Versatz zwischen den beiden Datensätzen hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Zuordnung des Algorithmus.

Im folgenden startet der spezifische Algorithmus, die einzelnen Komponenten des Algorithmus werden im Laufe der Arbeit genauer behandelt, so wird *AIS zum Koordinaten-Ursprung verschieben* in Unterabschnitt 4.2.2 behandelt und wie das initiale Heading den Algorithmus beeinflusst wird in 4.23 erklärt.

Das Ergebnis des Algorithmus ist die Zuordnung zwischen den Punkten und der Rotationsunterschied, welcher benötigt wurde um die Punktmengen ineinander zu überführen. Die Zuordnung wird für den in 4.3 erklärten Position-Fix Algorithmus benötigt und die Rotation, welche benötigt wird um beide Punktwolken einander zuzuordnen entspricht dem Heading des Eigenschiffes. Die Bestimmung des Headings auf diese Weise ist möglich, da die ARPA-Daten von der relativen Ausrichtung des Schiffes abhängen, die AIS-Daten jedoch nach Norden ausgerichtet sind. Somit entspricht eine Drehung der ARPA-Daten, bis sie mit den AIS-Daten übereinstimmen, dem Winkel zwischen der Ausrichtung des Schiffes und der Himmelsrichtung Norden. Dies ist der Winkel, in welchem das Heading eines Schiffes angegeben wird.

Mit den Ergebnissen des Coherent Point Drift Algorithmus kann nun der Position-Fix die Eigenposition bestimmen (4.3) und diese als Positionsangabe über eine NMEA-Nachricht an die Brücke senden. Zusätzlich wird noch eine Visualisierung des Ergebnisses über die von Herrn André Becker entwickelte Netzwerkschnittstelle an die ECDIS gesendet.

4.2.2 Ungenauigkeiten durch den Erdellipsoid

Der Coherent Point Drift Algorithmus basiert auf Koordinaten in kartesischer Form. In dieser Arbeit wurde dieser, auf geodätische Koordinaten angewendet. Wodurch einige Genauigkeitsprobleme entstanden, die im weiteren erläutert wer-

den und eine Lösung präsentiert wird.

Das erste Problem beruht auf der Translation, welche der Algorithmus anwendet um die Distanz zwischen zwei Punktwolken zu minimieren.

Die Translation basiert auf dem Unterschied der Punktwolken in x und y Achse. Dies ist zwar korrekt in einem kartesischen Koordinatensystem, wo der Abstand zwischen zwei Punkten über die Euklidische Norm bestimmt werden kann, jedoch nicht wenn mit geodätische Koordinaten gearbeitet wird. Der Grund hierfür ist, dass der Abstand zwischen den Längengraden zwischen Nord- bzw. Südpol und dem Äquator sich je nach Position ändern. Als Folge hiervon ist es zwar möglich die Punktwolken zueinander zu bewegen, jedoch ist die Translation, welche der Algorithmus bestimmt, mit einem Fehler versehen. Diese Abweichungen die durch dieses Problem entstanden sind verhalten sich proportional zum Abstand der beiden Punktwolken. Der Abstand zwischen den Punktwolken kann beliebig groß sein, da die ARPA-Punktwolke ohne eine absolute Positionsangabe in Polarkoordinaten vorliegt und somit eine initial Position benötigt wird um aus dieser geodätische Koordinaten zu erstellen.

In der folgenden Tabelle wird gezeigt wie der Fehler sich mit steigender Translation verhält. Hierfür wurden die Distanzen auf dem Erdellipsoid zwischen zwei Punkten beobachtet, welche mittels einer Translation immer weiter von ihrer originalen Position verschoben wurden.

Translation (lat/lon)	(0/0)	(10/10)	(20/20)	(30/30)	(40/40)	(50/50)
Distanz (m)	24758,5	24683,9	24478,9	24164,8	23775,7	23355,8
Abweichung (m)	-	74,5581	279,609	593,68	982,744	1402,62

Tabelle 4.2: Fehler durch Translation auf dem Erdellipsoid

Es ist deutlich zu erkennen, dass desto größer die Strecke wurde über welche die Punkte mittels der Translation verschoben wurden, desto größer wurde auch der Fehler in der Distanz zwischen diesen Punkten. Somit gilt es die Translation so klein wie möglich zu halten, damit dieser Fehler keine signifikanten Auswirkungen auf das Ergebnis hat.

Das zweite Problem entstand durch die Rotation, welche Teil des Algorithmus ist. Bei einer Rotation werden alle Punkte einer Punktwolke um den Ursprung des Koordinatensystems gedreht und erhalten somit eine neue Position. Durch das Rotieren einer kartesischen Punktwolke um den Ursprung ändern sich die Positionen der Punkte, jedoch nicht die Abstände zwischen den Punkten. Wenn man geodätische Koordinaten rotiert ändern sich ebenso die Positionen der Punkte, jedoch ändert sich hier auch der Abstand zwischen den Punkten auf Grund der Unterschiedlichen Abstände zwischen Längengraden. Die Abweichungen die durch dieses Problem entstanden sind, steigen mit dem Abstand zwischen den Punktwolken.

Die Lösung für das erste Problem (Translation), ist dass minimieren der initia-

len Abstände zwischen den Punktwolken. Die Translation die nun benötigt wird für das Überführen der einen Punktwolke in die andere resultiert in einer kleinen Abweichung, welche in Tests maximal 7m entsprach.

Die Lösung für das zweite Problem (Rotation) ist, dass verschoben des Schwerpunktes der zu rotierenden Punktwolke in den Ursprung des Koordinatensystems. Eine Rotation dieser Punktwolke bewirkt nun das der Schwerpunkt seine Position nicht verändert, wodurch die Punkte der Punktwolke eine minimale Positionsänderung durch eine Rotation erfahren.

Somit ist die Lösung für diese Probleme die Translation beider Punktwolken auf den Ursprung des Koordinatensystems, um so die Ungenauigkeiten so gering wie möglich zu halten. Dies hat auch den Effekt das Fehler, welche durch das verwenden der euklidischen Norm auf dem Erdellipsoid entstehen, geringer ausfallen, weil Längen- und Breitengrad im Ursprung des Koordinatensystems fast gleich lang sind.

Für die ARPA - Punktwolke ist dies trivial, da aufgrund der Radar Daten diese Punkte in Polarkoordinaten angegeben sind.

Die AIS - Punktwolke ist jedoch an ihre absolute Position gebunden, deswegen ist eine andere Methodik notwendig, um die Punktwolke, ohne Änderung der Abstände zwischen den Punkten, verschieben zu können. Die Methodik sieht das bestimmen des Schwerpunktes vor, zu welchem die Abstände und der Richtungswinkel von jedem Punkt bestimmt wird. Nun kann dieser Punkt verschoben werden und mithilfe der Abstände und Richtungswinkel, lässt sich die Punktwolke korrekt wiederherstellen. Der zu bestimmende Punkt ist der Schwerpunkt der AIS-Punktwolke, welcher sich über das arithmetische Mittel bestimmen lässt, solange es sich um eine nicht gewichtete Punktwolke handelt. Nun wird die Distanz und der Winkel zwischen jedem Punkt der Punktwolke und dem Schwerpunkt der Wolke bestimmt und gespeichert. Für die Berechnung der Distanz und der Winkel zwischen den Punkten wird die Vincenty Formel verwendet, damit keine Fehler durch die Erdkrümmung entstehen. Nun liegt die AIS-Punktwolke theoretisch in Polarkoordinaten vor. Das macht es möglich sie ebenso wie die ARPA - Punktwolke an den Ursprung zu platzieren.

Nun sind optimale Bedingungen geschaffen um eine Zuordnung zwischen den Punktwolken durch den Coherent Point Drift Algorithmus zu bestimmen.

4.2.3 Rotationsschwäche von Coherent Point Drift

Das erkennen von Rotation ist eine essentielle Eigenschaft, welche der Algorithmus benötigt um die Punktwolken einander zuzuordnen und somit auch das Heading des Eigenschiffes zu bestimmen. Die Rotation kann jeden beliebigen gültigen Wert entsprechen, da die Drehung der ARPA Punktwolke abhängig vom Heading ist und die Drehung der AIS Punktwolke immer nach Norden ausgerichtet ist. Somit ist jeder Rotationswinkel eine mögliche Lösung und das Problem kann nicht vorher behandelt werden.

Bei Experimenten mit dem Coherent Point Drift ist jedoch aufgefallen, dass dieser Rotation nur bis ca. 60° erkennen kann. Bei Punktwolken, welche mehr als 60° Rotationsunterschied besitzen, findet der Algorithmus möglicherweise nur ein lokales Minima und gibt dies als Lösung zurück. Die Ergebnisse des Experiments sind in Abbildung 1.3??? visualisiert. Diese Schwäche im erkennen der Rotation vom Coherent Point Drift Algorithmus wurde bereits in anderen Arbeiten festgestellt. [HIER PAPER VERLINKEN.](#)

In Tabelle 1.3??? wurden die Ergebnisse des CPD Algorithmus für verschiedene Rotationen bestimmt. Diese Messung wurde mit perfekten Daten ausgeführt, dass bedeutet das alle Punkte zugeordnet werden können, die Punkte perfekt aufeinander passen und das lediglich der Rotationswinkel der Punktwolken sie voneinander unterscheidet. Die Punkte der Punktwolke wurden zufällig anhand einer Normalverteilung erstellt und besteht aus 20 Punkten in geodätischen Koordinaten. Alle Angaben sind in Grad gegeben.

Rotationswinkel ($^\circ$)	Gefundenes Minima ($^\circ$)
0 - 70	0
80 - 140	111
150 - 160	172
170 - 220	230
230 - 300	282
310 - 0	0

Tabelle 4.3: Bestimmte Rotation durch CPD an perfekten Daten

Es ist deutlich zu erkennen, dass der CPD Algorithmus ab einem bestimmten Rotationswinkel, die korrekte Rotation nicht mehr findet und in einem lokalen Minimum terminiert. In den Testdaten von Tabelle 1.2??? werden fünf verschiedene Minima gefunden, je nach Rotation der Punktwolke.



Abbildung 4.2: Bestimmte Rotation durch CPD an perfekten Daten

Für dieses Problem wurde eine Lösung entwickelt, um die korrekte Rotation, sowie die korrekte Zuordnung zu bestimmen.

Hierfür wird der Algorithmus mehrfach ausgeführt, wobei nach jeder Ausführung die ARPA-Punktwolke rotiert wird und die Ergebnisse gespeichert werden. Für die kontinuierliche Rotation wurden 45° gewählt. Es wurden 45° gewählt, weil 45 der nächste ganzzahlige Teiler von 360 ist und welcher kleiner als 52 ist. Die 52° ist der kleinste Raum für das Erkennen der Rotation durch den CPD unter real nahen Daten. Die Rotation der ARPA-Punktwolke ist sehr simple, da sie bereits in Polarkoordinaten vorliegt. Nachdem der Algorithmus 8 mal ausgeführt wurde ($\frac{360}{45} = 8$) werden die Ergebnisse verglichen. Hierbei wird das Ergebnis mit dem geringsten Fehler zwischen den Punkten ausgewählt, da so das globale Optimum gefunden wird.

Diese Lösung hat natürlich einen großen Nachteil, welcher die Performanz des Algorithmus ist. Der Algorithmus muss acht mal gestartet werden um ein korrektes Ergebnis zu produzieren. Die achtfache Ausführung ist jedoch nur beim initialen Ausführen des Softwaremoduls nötig, weil nach dem ersten Durchlauf des Softwaremoduls ein Heading an die Brücke gesendet wird, welches beim nächsten Aufrufen des Algorithmus mitgesendet wird und somit ein initiales Heading existiert. Wenn ein Heading mitgesendet wird muss der Algorithmus nur einmal ausgeführt werden, weil die ARPA-Punktwolke nur um den Wert des negativen Headings gedreht werden muss und dadurch die Punktwolken eine Ähnliche Rotation aufweisen sollten.

4.3 Position-Fix

Der folgenden Abschnitt beschreibt die Berechnung der Eigenposition und des Sicherheitsbereichs, welche aus der Zuordnung und dem bestimmten Heading des CPD möglich ist.

4.3.1 Bestimmung der Eigenposition

Mit dem Ergebnis des Coherent Point Drift Algorithmus können ARPA - Punkte auf ihre zugehörigen AIS - Punkte zugeordnet werden. Dadurch ist nun bekannt wo dieser Punkt absolut auf der Karte liegt (AIS-Daten) und wie er relativ zu der Schiffseigenposition liegt (ARPA-Daten). Durch diese beiden Daten ist es möglich die Schiffseigenposition für jedes Paar zugeordneter Punkte zu berechnen.

Damit diese Rückrechnung auf die Eigenposition möglich ist, muss zuerst das relative Bearing aus den ARPA - Daten in *true* Bearing umgerechnet werden. Als *True* Bearing wird das Bearing bezeichnet, welches relativ zur Nord-Richtung angegeben wird. Diese Umrechnung ist möglich, da der CPD-Algorithmus auch das Heading des Schiffes bestimmt. Das Heading des Schiffes ist relativ zur Nord-Richtung und bietet somit die Möglichkeit über folgende Formel eine relative

Bearing Angabe in *True* Bearing umzurechnen:

b_{true} : *True* Bearing

b_{rel} : Relatives Bearing

h : Heading des Eigenschiffes

$$b_{true} = (b_{rel} - h) \mod 360$$

Nun kann von jedem Datenpaar eine individuelle Eigenposition bestimmt werden. Dies basiert auf der Lösung der 1. geodätischen Hauptaufgabe, diese ist das berechnen eines Punktes mit einem Startpunkt, einer Richtung und einer Distanz. Der Startpunkt sind die AIS Koordinaten, die Richtung ist das invertierte *true* Bearing und die Distanz kann aus den ARPA - Daten entnommen werden. Die Lösung der 1. geodätischen Hauptaufgabe lässt sich mithilfe der Vincenty Formel bestimmen.

Nachdem dies für jedes Datenpaar wiederholt wurde, existiert eine Punktwolke, welche die individuellen Eigenpositionen enthält. Zur Bestimmung der Eigenposition wird das arithmetische Mittel über diese Punktwolke gebildet. Falls die einzelnen Punkte vorher eine Gewichtung besitzen, zur Indizierung einer höheren Vertrauenswürdigkeit, kann hier auch das gewichtete arithmetische Mittel angewendet werden.

Die Auswirkung für die Verwendung eines gewichteten Arithmetischen Mittels anstatt des normalen arithmetischen Mittels ist in Abbildung 1.2??? zu erkennen. In der Abbildung haben die Punkte 6 - 10 eine höhere Gewichtung als die Punkte 1 - 4, was dafür sorgt, dass diese beim gewichteten Arithmetischen Mittel stärker berücksichtigt werden.

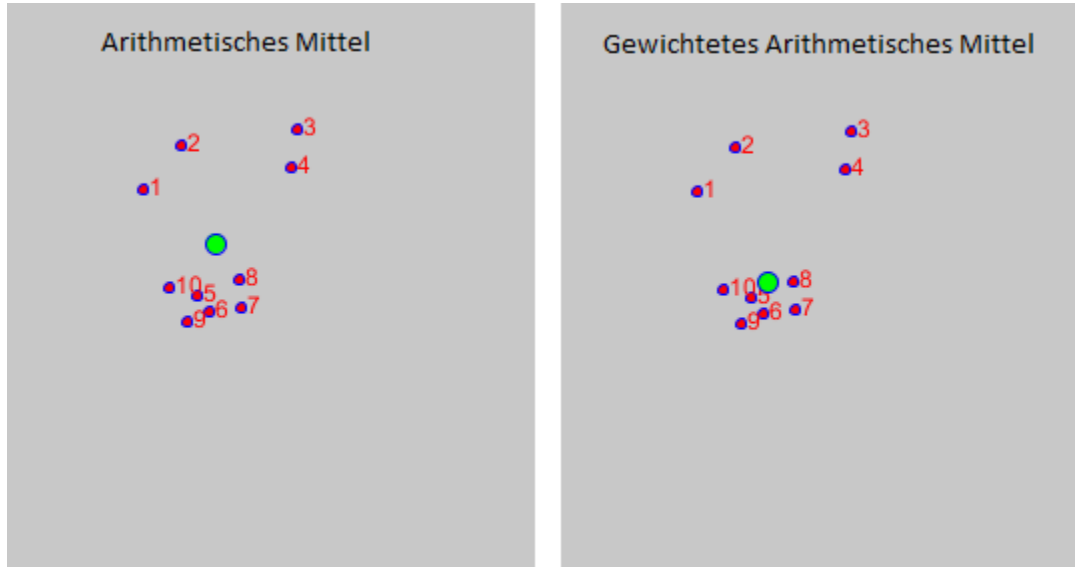


Abbildung 4.3: Arithmetisches Mittel der individuell zurückgerechneten Eigenpositionen

Die Abbildung zeigt wie stark die Genauigkeit der Positionsbestimmung erhöht werden kann, falls es möglich ist eine Aussage über die Genauigkeit oder die Vertrauenswürdigkeit der einzelnen Punkte treffen zu können. Das wäre möglich über das Unterscheiden von Schiffen und AtoNs oder einer manuellen Eingabe.

4.3.2 Bestimmung der Sicherheit der Eigenposition und Eliminierung von Ausreißern

Die Bestimmung der Eigenposition erfolgt über das arithmetische Mittel, dieses ist jedoch anfällig für Ausreißer in der Punktwolke. Zusätzlich ist es notwendig die bestimmte Eigenposition mit einer Sicherheit bzw. eines Sicherheitsbereichs angeben zu können.

Durch die Anfälligkeit des arithmetischen Mittels auf Ausreißer, ist es notwendig diese zu bestimmen und in gravierenden Fällen zu eliminieren. Dies kann jedoch nur angewendet werden, wenn genügend Punkte in der Punktwolke existieren, da sonst Ausreißer nicht eindeutig klassifiziert werden können.

Zur Erkennung der Ausreißer wird die Mahalanobis Distanz verwendet. Die Mahalanobis Distanz ist ein Abstandsmaß, welche angibt wie weit ein Punkt von der Verteilung einer Punktwolke abweicht. Das Ergebnis der Mahalanobis Distanz wird in Standardnormalabweichungen angegeben. Die Mahalanobis Distanz ist wie folgt definiert:

$\vec{X}_i = \begin{pmatrix} lat_i \\ lon_i \end{pmatrix}$: eine Zufallsvariable, welche die zurückgerechnete Position eines Datenpaars beschreibt. (*lat* ist der Breitengrad und *lon* der Längengrad des Punktes)

$\vec{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_{lat} \\ \mu_{lon} \end{pmatrix}$: Das arithmetische Mittel der Punktwolke

Σ : Die Kovarianzmatrix der Punktwolke für welche gilt $\det(\Sigma) \neq 0$

Mahalanobis-Distanz:

$$d(\vec{X}, \vec{\mu}) = \sqrt{(\vec{X} - \vec{\mu})^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot (\vec{X} - \vec{\mu})}$$

zur Berechnung der Mahalanobis Distanz wird nun das arithmetische Mittel und die Kovarianzmatrix bestimmt, jedoch ohne einbeziehen des Punktes zu welchem die Mahalanobis Distanz bestimmt werden soll, da sonst das Ergebnis verfälscht wird. Nachdem dies für jeden individuelle Eigenposition berechnet wurde ist es möglich Punkte zu entfernen, welche außerhalb einer bestimmten Prozentzahl der Verteilung liegen. Für diese Prozentzahl wurde 99,865% gewählt, das entspricht einem Z-Wert der Standardnormalverteilung von 3. Somit werden Punkte entfernt die Außerhalb von 99.865% der Verteilung liegen.

Nachdem die Ausreißer entfernt wurden ist es wichtig die Genauigkeit des Ergebnisses angeben zu können. Hierfür wurde sich entschieden einen Sicherheitsbereich zu bestimmen, durch welchen eine prozentuale Sicherheit gegeben werden kann, wie wahrscheinlich es ist sich in diesem Bereich zu befinden. Dieser Sicherheitsbereich wird mithilfe der Mahalanobis Distanz bestimmt. Man setzt die Mahalanobis Distanz auf einen festen Wert, wie z.B. 2,33 was ca. 99% Sicherheit entspricht. Nun kann durch einsetzen des arithmetischen Mittels und der Kovarianzmatrix eine Menge an Punkten bestimmt werden, welche diese Mahalanobis Distanz haben. Die Form der Punkte entspricht einer Ellipse, welche der Sicherheitsbereich ist. Eine Visualisierung dieses Ablaufs ist in Abbildung???? zu erkennen. Die roten Punkte sind zurückgerechnete Eigenpositionen, wobei 10 ein Ausreißer ist, welcher das Resultat einer falschen Zuordnung sein könnte. Die blauen Ellipsen indizieren die Standardabweichungen vom Faktor 0,5 bis 2,0 von innen nach außen.

Abbildung 4.5: Visualisierung zur Anzeige des Ergebnisses auf der Seekarte

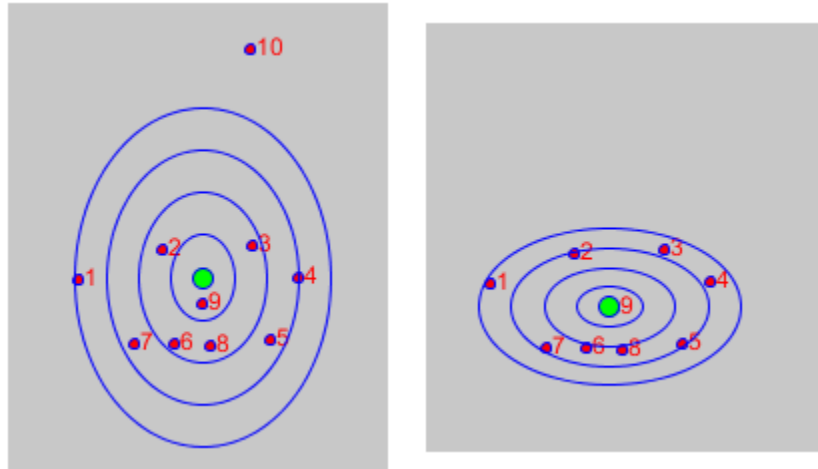


Abbildung 4.4: Eliminierung von Ausreißern und Darstellung des Sicherheitsbereichs

Es ist klar zu erkennen wie groß die Auswirkung eines Ausreißers auf die Eigenposition und den Sicherheitsbereich ist.

4.3.3 Erstellung des Ergebnisses

Nach dem Position-Fix Algorithmus wurden alle benötigten Daten berechnet um die Eigenposition, das Heading und eine geeignete Visualisierung darzustellen. Die Eigenposition und das Heading werden als NMEA-Nachricht an die Brücke gesendet, da ihre Daten so intern wie die Daten eines Sensors behandelt werden und dadurch eine Integritätsprüfung im Vergleich zu den anderen Sensoren möglich ist. Die Visualisierung und zusätzliche Daten, wie der Sicherheitsbereich, werden über die Netzwerkschnittstelle von Herrn André Becker an die ECDIS übermittelt. Die Visualisierung ist eine SVG-Grafik, welche beispielhaft in Abbildung ??? abgebildet ist.

5. Bewertung

5.1 Genauigkeit

Tests mit Generatordaten werden dargelegt, erklärt und ausgewertet. Es werden außerdem Methoden zur Genauigkeitssteigerung des Algorithmus bewertet.

5.2 Robustheit

Tests mit Generatordaten mit zunehmenden Ausreißern und Auswertung der Ergebnisse

5.3 Ausblick

Mögliche Optimierungen für den Algorithmus werden beschrieben.

6. Schluss

6.1 Zusammenfassung