



DIPLOMARBEIT

Verortung hydrographischer Aufnahmen von kleinräumigen Gewässern mittels GPS und MEMS IMU

ausgeführt am Institut für
Geodäsie und Geophysik

unter der Anleitung von
Univ. Prof. Dipl.Ing. Dr. Andreas Wieser

durch
Eva Maria Harreither
Steinholz 5
3263 Randegg

Wien, am 10. Februar 2011

Ich widme diese Arbeit meiner geliebten Familie.

Danksagung

Ein ganz spezieller Dank ergeht für die verständnisvolle und intensive Betreuung an Prof. Dr. Andreas Wieser, der mich mit seiner Erfahrung, seinem Fachwissen und vor allem mit Rat und Tat zu jeder Zeit sehr unterstützt hat. Ich möchte mich auch bei allen Mitarbeitern des Instituts für Geodäsie und Geophysik der Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie bedanken. Ich bedanke mich auch bei Gottfried Thaler aus der Forschungsgruppe Höhere Geodäsie für die Bereitstellung der Beobachtungsdaten der GPS-Permanent Station.

Ich bedanke mich bei den Herren Dr. Mayr und DI Reiner von der FLUSSBAU – MAYR & SATTLER OEG sowie Dr. Grillmayer, die die hydrographischen Aufnahmen ermöglicht haben und bei Fragen zur Auswertung von Echolotdaten zur Seite gestanden haben.

Weiters möchte ich meinen Studienkollegen, Resi, Simon, Philipp und Stefan, welche mir bei etwaigen Fragen geholfen haben, und insbesondere meiner besten Freundin Maria recht herzlich danken.

Bei meiner Familie will ich mich für die Unterstützung während der gesamten Studienzzeit bedanken. Ich konnte mich an den Wochenenden immer ausschalten. Sie zeigten Verständnis, wenn ich einmal lernen für eine Prüfung lernen musste. Besonders meine Mama hat immer an mich geglaubt. Bei meinem Onkel und seiner zukünftigen Frau will ich mich hiermit nochmals für das Korrekturlesen bedanken.

Schlussendlich will ich mich ganz besonders bei dir, Herbert, bedanken. Dank deiner Liebe und deinem Lächeln waren Rückschläge im Studium sofort vergessen. Ich liebe dich und ich freue mich schon auf die gemeinsame Zeit in unserem neuen Zuhause.

Kurzfassung

Zur hydrographischen Vermessung von großen und mittleren Gewässern werden zumeist Sonar- und Echolotsysteme eingesetzt. Für die Verortung von Echolotdaten werden häufig RTK-GPS oder Totalstationen eingesetzt. Für die Verortung von Sonardaten benötigt man zusätzlich die räumliche Orientierung des Sonarsystems.

In dieser Arbeit wurde die Eignung eines kostengünstigen Messsystems basierend auf einem Einfrequenz-GPS-Empfänger und einer MEMS IMU zur Bestimmung der Position und Orientierung eines hydroakustischen Sensors untersucht. Zusätzlich wurde ein Magnetometer zur azimutalen Stabilisierung des Messsystems eingesetzt.

Kostengünstige Inertialsysteme weisen große Fehler auf, die mit Hilfe von der Positions- und Geschwindigkeitsinformation aus GPS-Beobachtungen ausgeglichen werden können. Die Kombination der Sensordaten erfolgte in der institutseigenen Kalman Filter Software. Zur Einbindung der Azimutbeobachtungen mussten neue Algorithmen in die Software eingearbeitet werden. Das Kalman Filter benötigt genaue Rauschparameter zur Charakterisierung der IMU-Qualität; diese Parameter wurden in einem Laborversuch mit Hilfe der Allan Varianz abgeschätzt.

Eine hydrographische Vermessung wurde durchgeführt um reale Messdaten für die weitere Analyse zu erhalten. Die Messdaten wurden in der adaptierten Software prozessiert. Die Analyse der prozessierten Messdaten und der daraus abgeleiteten Gewässersohle zeigte, dass die erwünschte Genauigkeit von 10 cm (1σ) bei einer Wassertiefe von 15m mit dem untersuchten kostengünstigen Messsystem erreichbar ist. Im Zuge der Arbeit wurde jedoch auch Verbesserungspotential identifiziert, vor allem betreffend die Verarbeitung von Daten, die während der Wendemanöver anfallen.

Abstract

The most economical methods for surveying medium and large inland water bodies are based on sonar and echo sounding systems. Today RTK-GPS or total stations are used to position the echo sounding system. 3D orientation is needed as well to position sonar data.

In this thesis the development of an integrated low-cost navigation system based on GPS and MEMS inertial sensors for the determination of position and attitude of the echo sounding system is investigated. A magnetometer is used to estimate the azimuth and is essential to stabilize the whole measurement system.

Low-cost inertial sensors exhibit large errors which can be compensated using information on position and velocity as provided by GPS. The data of the individual sensors are combined in a Kalman filter software. New algorithms to include azimuth observations were added to the software. The Kalman filter relies on the correct quantification of the noise parameters of the MEMS IMU, which were determined in a laboratory test using the Allan Variance method.

A hydrographic survey was carried out in order to assess the algorithms using real data. The assessment shows that the proposed system should be further improved especially with respect to measurements during sharp turns. However, the results also indicate that the desired accuracy of 10 cm (1σ) with water depths of 15 m can be achieved using single-frequency GPS, a MEMS IMU and a magnetometer for positioning and orienting the hydrographic sensors.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Motivation	3
1.2	Ziele und Rahmenbedingungen	4
2	Hydrographie	5
2.1	Lotung	5
2.1.1	Echolotsysteme	6
2.2	Sonarsysteme	8
2.3	Ortung	9
2.4	Genauigkeitsanforderung an das Ortungssystem	10
3	Systemmodell	12
3.1	Sensoren	13
3.1.1	GNSS-System	14
3.1.2	IMU	15
3.1.3	Magnetometer	17
3.2	Synchronisation	18
3.3	Kalmanfilter	20
3.3.1	Koordinatensysteme	21
3.3.2	Einbindung der IMU Beobachtungen	23
3.3.3	Einbindung der GPS Beobachtungen	25
3.3.4	Einbindung von Azimutbeobachtungen	28
3.3.5	Nutzen der Koordinaten- und Geschwindigkeitsbeobachtungen	29
3.4	Verortung der Echolotdaten	30
4	Charakterisierung der IMU mittels Allan-Varianz	33
4.1	Berechnung der Allan-Varianz	34
4.2	Weißes Rauschen	34
4.3	Random Walk	36
4.4	Experimentelle Bestimmung der Rauschdichten des MP II	37
5	Messungen	40
5.1	Testmessung mit Messroboter	40
5.2	Hydrographische Messung	44
5.2.1	Messaufbau	45
5.2.2	Messablauf	47
6	Auswertung	50

6.1	GPS-Auswertung	50
6.1.1	Referenzstation	50
6.1.2	Auswertung der Messfahrten	50
6.2	GPS-IMU Auswertung	52
6.3	Darstellung der Echolotdaten	58
7	Zusammenfassung	61
A	Verwendete Programme	68

Abkürzungen

C_r^s Rotationsmatrix zur Drehung des r-Koordinatensystems in das s-Koordinatensystem

APOS Austrian Positioning Service

EPOSA Echtzeit Positionierung Austria

GNSS Global Navigation Satellite System

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IMU Inertiale Messeinheit

INS Inertiales Navigationssystem

MEMS Mikro-elektronische und mechanische Sensoren

NMEA National Marine Electronics Association

RMS Root Mean Squarre

RTK Real Time Kinematic

SBAS Satellite Based Augmentation System

UTC koordinierte Weltzeit

1 Einleitung

Für die hydrographische Vermessung von Gewässern werden neben manuellen Methoden Echolot-Systeme und Sonar-Systeme eingesetzt. Im Allgemeinen wird eine Genauigkeit von 1% der Wassertiefe in Lage und Höhe von den Systemen verlangt. Für eine Wassertiefe von 15 m wird beispielsweise eine Genauigkeit von 15 cm gefordert. Beim Einsatz eines einzelnen Vertikalecholotes und bei ruhiger Wasseroberfläche genügt die Bestimmung der *Position* des Echolot-Systems zur Verortung der Aufnahmen. Das gelingt heute mit Hilfe von GPS RTK oder mit Hilfe einer zielverfolgenden Totalstation vom Ufer aus.



Abb. 1.1: Hydrographische Vermessung mit Einzelecholot und GPS-RTK. Quelle: FLUSSBAU – MAYR UND SATTLER OEG.

Seitsichtsonar-Systeme sind stark geneigt ausgerichtet. Sie ermöglichen eine höhere Flexibilität bei der Aufnahme, z. B. für die Erfassung von Uferbereichen und vertikalen Einbauten unter Wasser sowie zur Überwachung von Buhnen. Allerdings ist zur Verortung der Sonar-Aufnahmen neben der Bestimmung der Position des Sonar-Systems auch die Bestimmung der räumlichen Orientierung (Azimut und Neigung) mit ausreichender Genauigkeit erforderlich.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll untersucht werden, ob eine Kombination aus MEMS IMU und GPS die erforderliche Genauigkeit liefern kann. Eine MEMS IMU ist eine inertielle Messeinheit mit mikro-elektromechanischen Sensoren zur Messung von Winkelgeschwindigkeiten und linearen Beschleunigungen. Solche IMUs zeichnen sich durch hohe Robustheit und

geringen Preis (einige 100 bis wenige 1.000 EUR) aus. Die Herausforderung besteht darin, die unvermeidlichen Abweichungen - wie z. B. Bias Instabilität - der MEMS IMU in den Griff zu bekommen und die aktuelle Orientierung mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Mit Hilfe der IMU Beobachtungen können im Erfolgsfall

1. die Orientierungsparameter bestimmt,
2. die GPS-Lösungen stabilisiert,
3. GPS-Ausfälle überbrückt werden.

Die Kombination der GPS und IMU-Beobachtungen erfolgt in einem Kalman-Filter. Das Filter soll die Fehler der IMU bestmöglich schätzen und so deren Abweichungen minimieren.

1.1 Motivation

Als Verortungssysteme für hydrographische Aufnahmen von kleinräumigen Binnengewässern werden heute einerseits eine reine RTK-GPS Positionierung oder eine terrestrische Positionsbestimmung mittels einer Totalstation verwendet (Pilgram, 2006). Hierbei ist die GPS-Antenne oder das Prisma vertikal über dem Messschwinger befestigt. Für die Verortung wird die Neigung des Bootes und somit des Schwingers vernachlässigt. Andererseits wird an der Donau eine Multisensor-Plattform, bestehend aus einem RTK-GPS-System, Richtungssensoren (Kreiselkompass), Neigungssensoren (Gyroskop) und Beschleunigungssensoren (INS), zur Bestimmung der Position und der Orientierung betrieben (z. B. Messsystem der Via Donau). Aufgrund des Gewichts und der Größe der Sensoren muss als Geräteträger ein größeres Boot eingesetzt werden. Die Einsatzgebiete dieser Systeme beschränken sich auf große Flüsse, Hafenbereiche und große Binnenseen. Die Anschaffungskosten der Sensoren übersteigen zumeist die 100.000 EUR Grenze. Die Kosten des Messaufwandes (Überstellung, Wartung der Sensoren) machen einen flächendeckenden Einsatz in Österreich unrentabel.

Bei Heine et al. (2005) konnte gezeigt werden, dass zum Beispiel für Vertikalecholotmessungen eine Kopplung von RTK-GPS und Totalstationen ein effizientes Positionierungsverfahren darstellt. In Bereichen von starken Strömungen und großen Fließgeschwindigkeiten zeigte sich, dass die Annahme der vertikalen Anordnung von Positionierungsverfahren und Echolotschwinger, die Gültigkeit verliert. In Heine (2006) wurde dieses System daher durch weitere zwei GPS-Antennen ergänzt, umso die Neigungen des Bootes mit einer geschätzten Genauigkeit von 1° zu bestimmen.

Für die hydrographische Vermessung an mittleren und kleinen Flüssen und im Speziellen für Sonaraufnahmen soll eine weitere kostengünstige Alternative gesucht werden. Die Befahrung von mittleren und kleinen Flüssen ist nur mit kleinen und wendigen Booten möglich. Daher sollen die Sensoren leicht sein. Besonders Forschungsaktivitäten wie Hide et al. (2003) oder Wendel et al. (2006) zeigen die erfolgreiche Kombination von MEMS IMU und trägerphasenbasierten GPS zur Navigation von unbemannten Flugzeugen oder Helikoptern. Eine derartige Kombination soll hier für die Verortung von hydrographischen Aufnahmen untersucht werden

1.2 Ziele und Rahmenbedingungen

Das Ziel der Arbeit war, zu untersuchen, ob ein Messsystem aus GPS und MEMS IMU eine Verortungsgenauigkeit von 10 cm (1σ) bei einer Wassertiefe von 15 m erreichen kann¹. Ein solches System stellt eine kostengünstige Variante für die hydrographische Vermessung auf kleinräumigen Binnengewässern ($\leq 1 \times 1 \text{ km}^2$) dar.

Zur Überprüfung dieser Forderung sollte eine hydrographische Vermessung mit der Firma FLUSSBAU - MAYR UND SATTLER OEG (Wien/Klagenfurt) in Kärnten durchgeführt werden. Ein Einzelecholot sollte dabei eingesetzt werden, weil die Messdaten leichter zu vergleichen sind als bei Sonaraufnahmen. Als Restriktion wurde festgesetzt, dass nur vor und nach der hydrographischen Vermessung eine Kalibrierung beziehungsweise eine spezielle Einrichtung des Messsystems vorgenommen werden darf.

Die realen Messdaten sollten mit einer eigenen Aufzeichnungsroutine gespeichert und im Post-Processing mit verschiedenen Algorithmen und Einstellungen des Kalman Filters analysiert werden. Dabei erfolgt die Auswertung in der institutseigenen Kalman Filter Software KF_run. Zur Beschreibung der Fehler der IMU müssen geeignete stochastische Parameter abgeleitet werden. Dazu sollte die Methode der Allan-Varianz angewendet werden.

Geeignete Messinstrumente sollten neben der institutseigenen MEMS IMU ausgewählt und zu einem Messsystem zusammengestellt werden. Die Entwicklung und Erprobung des Messsystems soll an der TU Wien mit Hilfe von kurzen, kinematischen Testmessungen erfolgen.

Schlussendlich sollte eine Genauigkeitsanalyse der verorteten Tiefenmessungen vorgenommen werden. Die Ergebnisse sollten kritisch beurteilt und Vorschläge für die praktische Arbeit sowie die Datenanalyse ausgearbeitet werden.

¹Mayer Peter (2010), persönliche Mitteilung.

2 Hydrographie

Die Hydrographie beschäftigt sich mit der Beschreibung und Darstellung von Gewässern, sowohl von Meeren, Flüssen und Seen als auch vom Grundwasser. Ein Teilbereich der Hydrographie ist die Fluss- und Seegrundvermessung. Die Fluss- und Seegrundvermessung hat in Österreich eine lange Tradition. Die Donau stellt eine wichtige Wasserstraße in Europa dar. Durch die wasserbaulichen Konzepte ist die Donau zwar ruhiger und leichter schiffbar als in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, doch durch die gesunkene Wasserfließgeschwindigkeit kommt es zu mehr Verlandungen. Eine Aufgabe der Flussgrundvermessung ist die Kontrolle und Ausweisung der Wasserstraßen in Österreich.

Im Bereich von Laufkraftwerken hat die Fluss- und Seegrundvermessung die Aufgabe, die Wassermenge im Stauraum zu ermitteln. Durch die Bestimmung des Gewässeruntergrunds kann das aktuelle Speichervolumen aufgrund des Pegelstandes berechnet werden. Aufgrund von Verlandungen muss der Stauraum in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden, falls erforderlich, müssen Baggerarbeiten eingeleitet werden. Die Überwachung der Baggerarbeiten ist ebenfalls ein Aufgabengebiet der Fluss- und Seegrundvermessung. Weitere Aufgabengebiete sind die Unterwasser-Bauwerksüberwachung, die Objekt- und Hindernissuche, morphologische Untersuchungen der Gewässersohle sowie der Uferbereiche.

Die Beobachtung in der Hydrographie wird als Peilung bezeichnet und setzt sich aus Lotung, Ortung und Zeitbezug zusammen. Der Zeitbezug ist über das Aufnahmedatum leicht zu ermitteln. Unter Lotung versteht man die Ermittlung der relativen Tiefe der Gewässersohle. Die Ortung ist die Bestimmung der absoluten Lage und Höhe des Bezugspunktes der Lotung.

2.1 Lotung

In kleineren Gewässern beziehungsweise schmalen Flussläufen ist es heute noch üblich, die Wassertiefe manuell zu bestimmen. Dabei wird entlang von definierten Profilen eine Peilleine gespannt. Bei jedem Meter wird eine Tiefenlotung mittels Peilstangen oder Peilloten durchgeführt. Die Stange oder das Lot wird vertikal abgesenkt und die Eindringtiefe ermittelt. Die Messung sollte von einem möglichst ruhenden Boot aus getätigt werden, um Messfehler der Lotung gering zu halten. Auch seitliches Durchhängen oder Nachziehen des Lotes infolge der Strömung, Abrutschen an Hängen, ungleichmäßiges Einsinken des Stabes oder des Gewichtes und Auftrieb des Gewässers können die Messergebnisse verfälschen. Die Schnur- und Drahtlotung weist eine Genauigkeit von 1% – 3% der Wassertiefe auf Pilgram (2006).

Bedingt durch den hohen Arbeitsaufwand ist es bei größeren Gewässern wirtschaftlicher, die Gewässersohle mit hydroakustischen Sensoren, wie etwa Echolot- oder Sonar-Systemen, aufzumessen. Die Messgeräte beruhen auf dem seismischen Prinzip. Ein Schwinger erzeugt

Schallimpulse. Die Schallwellen breiten sich im Wasser aus. An der Grenze zwischen Wasser und Gewässersohle kommt es wegen der unterschiedlichen akustischen Impedanz der beiden Medien zur Reflexion der Schallwellen.¹ Die reflektierten Schallwellen werden durch denselben oder einen zweiten Schwinger aufgenommen. Bei Echolotsystemen wird die Laufzeit des reflektierten Schallimpulses gemessen und über die Wasserschallgeschwindigkeit kann die Entfernung (Tiefe) des Reflektors berechnet werden. Bei Sonarsystemen wird die Intensität der reflektierten Impulse gemessen. Es werden bei dieser Methode keine Laufzeiten und somit keine Tiefenwerte gemessen, sondern primär Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit bzw. das Material des Reflektors abgeleitet.

2.1.1 Echolotsysteme

Der Echolot-Schwinger wird am Messboot typischerweise so installiert, dass er sich vertikal unter der GNSS-Antenne oder dem Reflektor befindet. Ein Echolot-Schwinger erzeugt mechanische Schwingungen die im Bereich von 10 kHz bis 700 kHz liegen. Von der gewählten Frequenz hängt die Durchdringung des Gewässeruntergrundes ab. Bei 10 kHz werden die Schallwellen erst an Gesteinen reflektiert, bei hohen Frequenzen dagegen bereits an einer Schlammschicht. Weiters wird der Schallimpuls durch spezielle Vorkehrungen eng gebündelt, sodass der „Footprint“, die abgetastete Fläche an der Gewässersohle, möglichst klein ist. Normalerweise beträgt der Öffnungswinkel rund 5°. Das bedeutet, dass der Footprint für eine Wassertiefe von 15 m einen Durchmesser von 1.3 m hat und eine Fläche von 1.34 m² abdeckt.

Bei einem Einzelschwinger-Echolot erzeugt im Allgemeinen ein einziger Messschwinger die Schallwellen und nimmt die reflektierten Wellen auf. Das Boot und der Echolotschwinger sind genähert horizontalisiert. Der Schallimpuls durchdringt das Wasser in vertikaler Richtung. Somit stellt die gemessene Entfernung des Reflektors genähert die Tiefe des Reflektors dar, siehe Abbildung 2.1. Die Erfassung der Gewässersohle erfolgt, wie bei der manuellen Methode, punktuell, da der Schwinger nur *einen* vertikalen Impuls aussendet. Zur flächenhaften Abbildung wird die Gewässersohle entlang von Längs- und Querprofilen abgetastet.

Für eine schnellere flächendeckende Erfassung der Gewässersohle werden Mehrfachschwingersysteme eingesetzt. Mehrere Echolotschwinger gleicher Frequenz sind auf seitlichen Auslegern äquidistant angebracht (Abstand in Abhängigkeit von der zu lotenden Gewässertiefe), siehe dazu auch Abbildung 2.2. Die Trennung der Reflexionsimpulse erfolgt durch zeitliche Abfolge der einzelnen Echolotschwinger (Lurton, 2010). Solche Systeme sind in der Anschaffung und in der Wartung sehr teuer. In Österreich werden Mehrfachschwingersysteme kaum eingesetzt, da aufgrund der eingeschränkten Beweglichkeit, der Größe des Messbootes und der kleinen Wasserflächen der Einsatz unrentabel oder unmöglich ist.

¹Die akustische Impedanz ist das Produkt aus Dichte des Mediums und der Schallgeschwindigkeit im Medium.

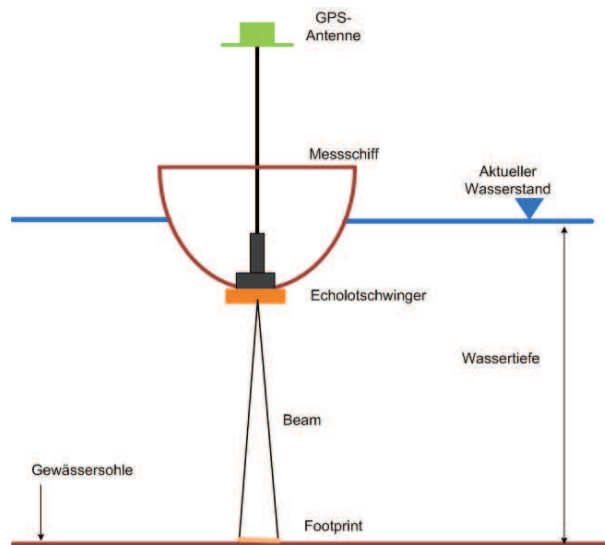


Abb. 2.1: Prinzip-Skizze des Einzelvertikalecholots.

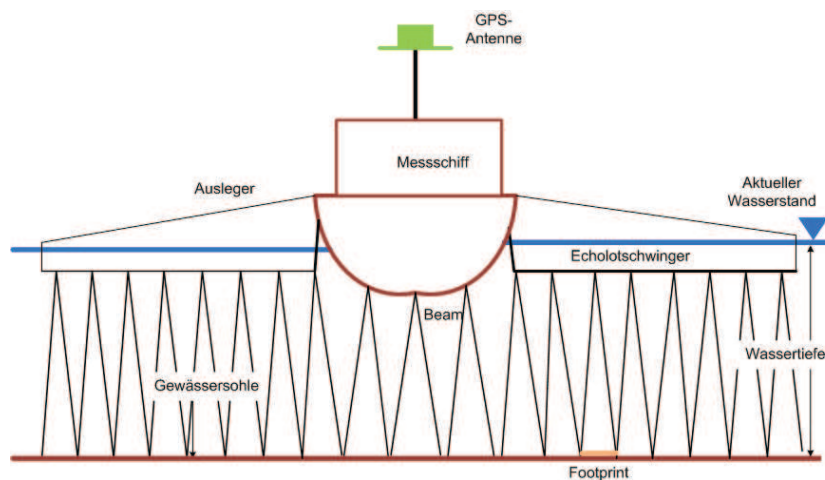


Abb. 2.2: Prinzip-Skizze des Mehrfachecholots.

Fächerecholote sind eine Mischung der beiden zuvor genannten Echolotsysteme. Ein einzelner fester oder zwei feste Schwinger erzeugen mehrere Impulse (Beams), die aber nicht nur lotrecht, sondern in Form eines Fächers ausgestrahlt werden. Somit können wie bei Mehrfachschwingersystemen bei einer Messfahrt größere Bereiche der Gewässersohle auf einmal aufgenommen werden. Die Wendigkeit des Messbootes bleibt aber erhalten. Zur Vermessung von größeren Flächen stellt das Fächerecholot eine gute und wirtschaftliche Lösung dar. Die Genauigkeit der Tiefenbestimmung ist gegenüber Vertikalecholoten, aufgrund der Neigung der äußeren Beams und somit der größeren Footprints schlechter. Die Abbildung 2.3 verdeutlicht das Prinzip von Fächerecholoten.

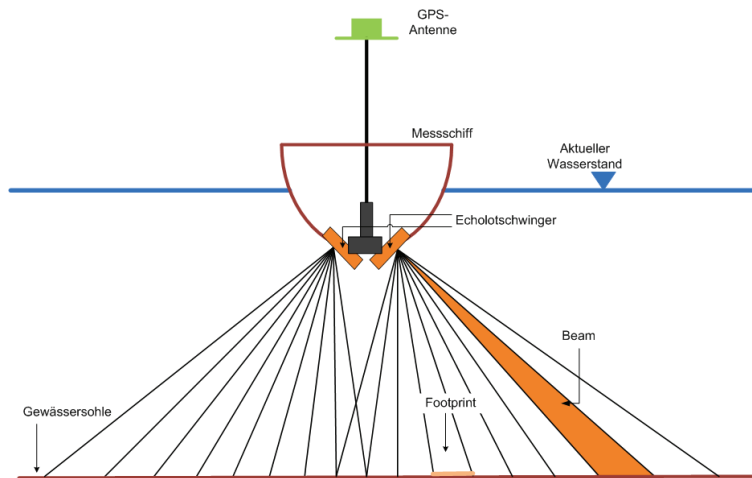


Abb. 2.3: Prinzip-Skizze des Fächerecholots.

Schlussendlich gibt es noch Systeme mit unterschiedlichen Frequenzen. Mehrfrequenzecholote nutzen die unterschiedliche Durchdringung der Gewässersohle in Abhängigkeit von der Frequenz der Schallwelle aus. Hierbei sind am Messboot mehrere Messschwinger mit unterschiedlichen Frequenzen installiert. Somit können Aussagen über die Mächtigkeiten und die Art der Gewässersohle oder der Sedimentschichten gemacht werden. Die Zuordnung der Messergebnisse zu bestimmten Sedimenten erfordert viel Fachkenntnis und Erfahrung vom Interpretieren. Die Methode versagt jedoch bereits bei Mächtigkeiten von über zwei Metern, bei fehlenden Dichteunterschieden und bei bestimmten granulometrischen Bedingungen (Pilgram, 2006).

2.2 Sonarsysteme

Sonarsysteme messen nur die Intensität der reflektierten Impulse. Sie arbeiten mit hochfrequenten Schallwellen im Bereich von rund 1 MHz. Durch Rotation des Messschwingers entsteht ein bewegtes Messbild auf dem Bildschirm. Die Reflexionen von nahen Objekten werden durch den kurzen Ausbreitungsweg im Wasser weniger absorbiert als Reflexionen von weit entfernten Objekten. Sie werden typischerweise als helle Bereiche dargestellt. Die Intensität nimmt mit der Entfernung ab und somit auch die Helligkeit. Aufgrund dieser Licht- und Schattenwirkung können Unterwasserobjekte leicht und schnell ausfindig gemacht werden. Dieses Verfahren eignet sich daher optimal zur Hindernissuche und Wracksuche. Die Intensität des reflektierten Signals ändert sich aber auch in Abhängigkeit zum abgetasteten Material. Dieser Effekt wird ausgenutzt um bodenmorphologische und abiotische Untersuchungen der Gewässersohle durchzuführen.

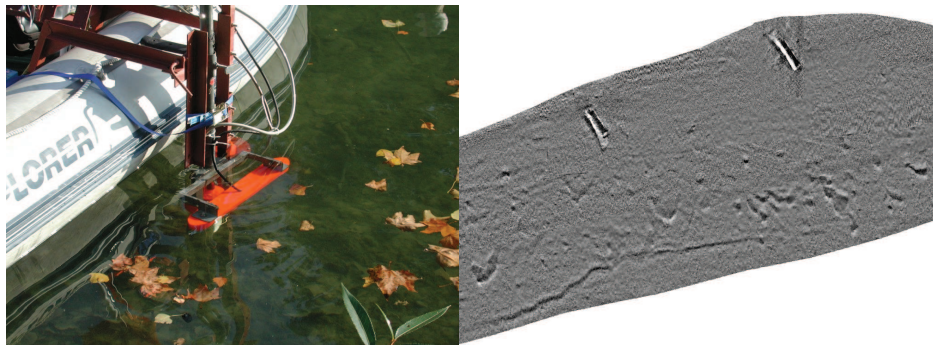


Abb. 2.4: Ein Side-Scan-Sonar montiert an der Bordwand des Messbootes sowie das Ergebnis einer Sonar-Aufnahme. (Quelle: www.terra.ch)

In der Geodäsie und in der hydrographischen Vermessung werden üblicherweise Seitsichtsonare eingesetzt. Hierbei sind zumeist zwei Sonargeräte an beiden Seiten des Messbootes fest montiert wie in Abbildung 2.4 links ersichtlich. Das Seitsichtsonar erzeugt einen ovalen Impuls, der anfangs nahe dem Nadir die Gewässersohle aufnimmt. Nach Empfang der Reflexionen wird wiederum ein Impuls mit geringerer Horizontalneigung ausgesendet. Die Gewässersohle wird somit an beiden Seiten des Messbootes abgebildet. Zusätzlich kann ein Vertikalecholot am Boot angebracht werden, um die Tiefe im Nadir bestimmen zu können. Somit können auch Gewässersohlenrutschungen oder Auskolkungen im Bereich von Buhnen und Brückenpfeilern vermessen werden. Die rechte Abbildung 2.4 zeigt ein wichtiges Aufgabengebiet des Sonarverfahrens, die Wracksuche. Bei der Wracksuche muss ein großes Gebiet aus Kostengründen schnell abgetastet werden, um ein verhältnismäßig kleines Objekt zu finden. Im Sonarbild sind im nördlichen Uferbereich zwei Objekte deutlich auszumachen. Es handelt sich hierbei um zwei Schiffswracks.

2.3 Ortung

Gleichzeitig zur Messung der Tiefe muss jeweils die aktuelle Position des Messbootes beziehungsweise des Messschwingers bestimmt werden. Für die Positionsbestimmung stehen in der Praxis üblicherweise zwei Verfahren zur Auswahl.

Erstens kann die Positionsbestimmung durch Polaraufnahmen erfolgen. Meistens werden automatisch zielverfolgende Totalstationen eingesetzt. Ein 360° Prisma ist vertikal oberhalb des Messschwingers befestigt. Die Totalstation zielt automatisch in definierten Zeitabständen den Reflektor an und registriert die Messgrößen. Voraussetzung für diese Methode ist, dass das gesamte zu vermessende Areal von einem Standpunkt an Land einsehbar ist und ein Anschluss zum Festpunktfeld möglich ist. Ansonsten muss bei jedem Standpunktwechsel eine freie Stationierung vorgenommen werden.

Zweitens wird in der Praxis GPS, insbesondere RTK-GPS, verwendet. Hierbei befindet sich die GPS-Antenne wiederum auf einem Masten oberhalb des Echolotschwingers. Entweder wird eine eigene GPS-Referenzstation in der Nähe des Messgebietes aufgebaut oder es werden die

Daten eines RTK-Anbieters (aktives Netz, z. B. EPOSA oder APOS in Österreich) verwendet. Der Vorteil ist, dass in Echtzeit die Position des Messbootes eingesehen werden kann und die geplanten Messprofile vom Steuermann des Bootes genauer abgefahren werden können. Grundvoraussetzung ist der ungestörte Empfang der Signale von ausreichend vielen und räumlich günstig verteilten Satelliten durch beide GPS-Empfänger. Besonders in der Nähe von Uferbereichen, steilen Böschungen und bei dichtem, überhängendem Pflanzenbewuchs kann es zu Ausfällen des Signalempfangs kommen. In solchen Bereichen ist dann – unter Umständen als Ergänzung zur GPS-Lösung – der Einsatz einer Totalstation nötig.

Wenn das Boot genähert horizontalisiert ist und während der Messung nur wenig Roll- und Nickbewegungen (aufgrund von Wellengang) des Bootes auftreten, kann vereinfacht angenommen werden, dass die Position der GPS-Antenne bis auf den bekannten Höhenoffset der Position des Echolotschwingers und in weiterer Folge der Position des Footprints entspricht. Für die Verortung von Einzelschwinger-Messdaten ist diese Form der Ortung zumeist ausreichend. Bei der Vermessung von schnell fließenden Gewässern ist die Erfassung der Roll- und Nickbewegungen hingegen nötig. Für die Verortung von Sonar-, Mehrfachecholot- und Fächerecholotaufnahmen müssten auch die Neigung und das Azimut des Schwingers bekannt sein. Durch den Einsatz einer IMU am Messboot können die Orientierungsparameter prinzipiell bestimmt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass GPS-Ausfälle vorübergehend überbrückt werden können. Eine navigationstaugliche IMU ist aber in der Anschaffung sehr teuer.

Die Bestimmung der Orientierungsparameter könnte auch auf einer Kombination aus Neigungssensoren und Kreiselkompassen basieren. Ein weiteres Mittel wäre, die Etablierung einer GNSS-Plattform durch Installation von drei GNSS-Antennen an Bord des Bootes. Der begrenzte Platz an Bord limitiert die einzelnen Basislinien auf 2-3 m. Die geforderte Verortungsgenauigkeit an der Gewässersohle von 10 cm könnte damit erreicht werden. Doch Abschattungen in Uferbereichen schränken das messbare Gebiet stark ein.

2.4 Genauigkeitsanforderung an das Ortungssystem

Für die Genauigkeitsangabe der Gewässersohle sind sowohl Fehlerquellen von der Lotung als auch von der Ortung zu berücksichtigen. In Rahmen dieser Arbeit werden nur die Lage- und Höhenfehler sowie die Fehler der Orientierungsparameter, also die Fehler der Ortung, betrachtet.

Die „IHO Standards for Hydrographic Surveys“ geben Genauigkeiten für die hydrographische Vermessung der Gewässersohle vor. Die Klasse „Special Orders“ bezieht sich auf die Vermessung von Tiefen bis zu 40 m (International Hydrographic Bureau, 1998). Die Lagegenauigkeit für Vermessungen dieser Klasse muss besser als $\delta L_{95\%} = 2$ m (95%-Konfidenzbereich) sein. Die Tiefengenauigkeit $\delta T_{95\%}$ lässt sich aus Formel 2.1 berechnen. Für d ist die Tiefe des Gewässers in Meter einzusetzen. Für 15 m Gewässertiefe ergibt sich eine Tiefengenauigkeitsanforderung für den verorteten Footprint von ± 27 cm.

$$\delta T_{95\%} = \pm \sqrt{0.25^2 + (0.0075 \cdot d)^2} \quad (2.1)$$

Unabhängig davon wurde für diese Arbeit definiert, dass die Lage und Höhe des Lotungspunktes für eine Wassertiefe von 15 Metern mit einer Genauigkeit von besser als 10 cm ($1\text{-}\sigma$) bestimmt werden soll. Die Positionsbestimmung mittels trägerphasenbasierter GPS-Lösung genügt dieser Anforderung. Die Frage ist nun, mit welcher Genauigkeit muss die totale Neigung θ und die Position des Echolotschwimmers P_s bestimmt werden. Eine vereinfachte Abschätzung ergibt sich mit Hilfe einer Varianzfortpflanzung. Hierbei wird die Unsicherheit der Bestimmung des Azimuts vernachlässigt und die Bedingung für eine jede Koordinate getrennt betrachtet. Die Abschätzung ist in Formel 2.2 angeführt

$$\begin{aligned}\sigma_{P_L}^2 &= \sigma_{P_s}^2 + \sigma_\theta^2 \cdot (d \cdot \cos \theta)^2 \\ \sigma_{H_L}^2 &= \sigma_{H_s}^2 + \sigma_\theta^2 \cdot (d \cdot \sin \theta)^2\end{aligned}\quad (2.2)$$

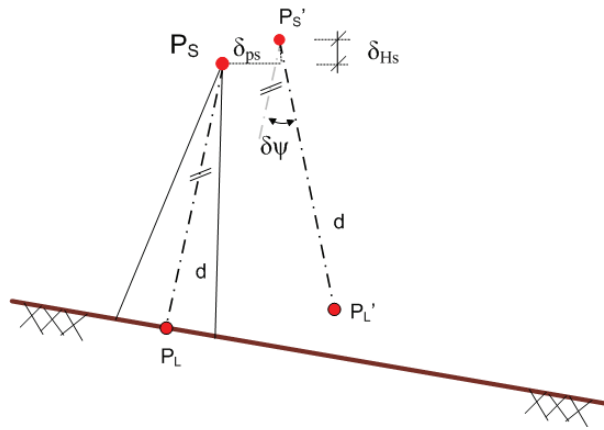


Abb. 2.5: Auswirkung von Positionierung und Neigungsfehler für die Verortung.

Die mögliche Auswirkung von Positionierungsfehlern δ_{P_s} und δ_{H_s} beziehungsweise vom Neigungsfehler δ_θ sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Die tatsächliche Position des Schwingers ist P_s und die Neigung des Sensors beträgt θ . Durch die Fehler des Verortungssystem wird die Gewässersohle im Punkt P'_L statt P_L dargestellt.

Für die Genauigkeitsabschätzung wird angenommen, dass die maximalen Werte für die Parameter $d = 15\text{ m}$ und $\theta = 5^\circ$ gelten. Die Genauigkeit der Position des Echolotsschwingers aus der trägerphasenbasierten GPS-Auswertung kann für kinematische Aufgaben mit $\sigma_{P_s} = 1\text{ cm}$ (pro Koordinate) und $\sigma_{H_s} = 3\text{ cm}$ angenommen werden. Somit muss die Neigung des Bootes mit einer Genauigkeit σ_θ von besser als 0.38° bestimmt werden, um die geforderte Lotungsgenauigkeit von 10 cm (1σ) zu erfüllen.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Orientierungsparameter (Neigung und Azimut) einen geringen Einfluss auf die Höhengengenauigkeit der Gewässersohle haben, solange θ klein ist. Die Orientierungsparameter sind entscheidend für die Lagegenauigkeit. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist die Lagegenauigkeit bei geneigten Gewässersohlen mitentscheidend für die korrekte Darstellung der Gewässersohle.

3 Systemmodell

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Position, die Neigungen und das Kursazimut des Bootes zu bestimmen, um damit die Echolotaufnahmen zu verorten. Das messtechnische Konzept ist in Abbildung 3.1 skizziert. Auf dem Messboot ist das Echolotsystem und das Verortungssystem fix montiert. Zur Positionierung wird ein GNSS-System verwendet. In der Nähe des Messgebietes ist eine eigene GNSS-Station als Referenzstation ¹auf einem bekannten Punkt aufgestellt. Somit ist der Bezug zum lokalen Koordinatensystem gegeben. Die Position des Bootes wird relativ zur Referenzstation bestimmt. Die Orientierung des Bootes wird mittels einer IMU bestimmt. Zu Analyse Zwecken und als Rückversicherung für den Fall, dass eine Azimutstützung nötig ist, wurde ein Magnetometer an Bord des Bootes eingesetzt. Die eingesetzten kostengünstigen Sensoren werden im Abschnitt 3.1 näher vorgestellt.

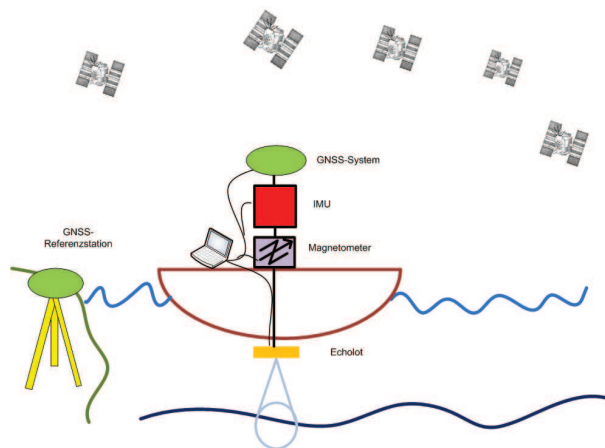


Abb. 3.1: Sensorkomponenten des Messsystems.

Im hydrographischen Experiment wird ein Echolotsystem statt eines Sonarsystems aufgrund der leichteren Bearbeitung und Kontrolle der Daten verwendet. Während des Experimentes werden die rohen Messdaten aller Sensoren aufgezeichnet. Die Analyse erfolgt im Post-Processing, um verschiedene Algorithmen und Einstellungen auszutesten. Es wurden aber nur Daten und Algorithmen verwendet, die auch für eine Echtzeitanwendung einsetzbar wären.

¹Es wurde hier, aufgrund der höheren Flexibilität für die Auswertung gegenüber einer Anbindung an ein GNSS Service wie APOS oder EPOSA, eine eigene Referenzstation vorgeschlagen. Somit können in der Entwicklungsphase verschiedenste Varianten und Einstellungen im Postprocessing ausgetestet werden. Bei einer Umsetzung des Konzeptes in ein kommerziell einsetzbares System wäre auch die Verwendung eines GNSS Service denkbar.

Die Aufzeichnung der Daten ist in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. Auf dem Messboot wurden alle Daten der Sensoren über einen feldtauglichen Laptop aufgezeichnet. Die IMU wurde mit einem 12 V Akku mit Strom versorgt. Für alle anderen Sensoren wurde die Stromversorgung des Bootes verwendet. Auf der Referenzstation wurde ein autarkes System zur Datenaufzeichnung verwendet. Dabei wurden die Rohdaten des GPS-Empfängers mit Hilfe eines Datenloggers über die gesamte Messdauer aufgezeichnet. Die Stromversorgung erfolgte hier ebenfalls mit einem 12 V Akku.

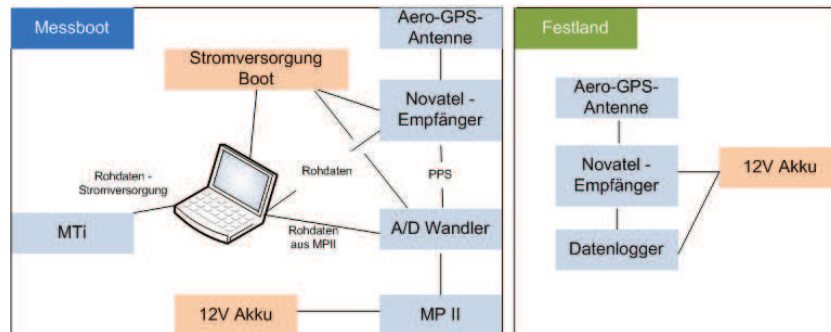


Abb. 3.2: Prinzipskizze der Datenaufzeichnung auf dem Messboot und an der Referenzstation.

Eine IMU misst die linearen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten gegenüber einem Inertialsystem. Die Messwerte beinhalten auch die Schwerebeschleunigung, die Erddrehung und die Coriolis-Kraft. Die Beobachtungen müssen im Zuge der Auswertung um diese Effekte bereinigt und in ein erdfestes Koordinatensystem umgerechnet werden. Die Position aller Sensoren am Boot wird in einem gemeinsamen Koordinatensystem, dem Objekt- oder „b-System“, definiert. Das rechtshändige, kartesische Objektkoordinatensystem wird durch die Bootsachsen aufgespannt. So weist die x-Achse des Objektkoordinatensystems in die Längsachse des Bootes und die z-Achse weist nach oben. Der Echolotschwinger ist ebenfalls fix am Boot montiert und kann auch in diesem System angegeben werden. Im Kalman Filter selbst wird die Position des Ursprungs des Objektkoordinatensystem und dessen Orientierung gegenüber dem erdfesten Koordinatensystem geschätzt. Anhand dessen können die aktuelle Position, die Neigungen des Schwingers und das Azimut berechnet und die Echolotmessungen verortet werden.

3.1 Sensoren

In diesem Abschnitt werden die eingesetzten Sensoren näher vorgestellt. Die meisten Sensoren waren bereits am Institut für Geodäsie und Geophysik vorhanden. Für spätere Anwendungen können vergleichbare Sensoren eingesetzt werden. Wichtige Einstellungen und Parameter bei der Bedienung der Geräte sind ebenfalls hier angeführt. Am Ende wird auf die Synchronisation von GPS und IMU eingegangen.

3.1.1 GNSS-System

Die NOVATEL FlexPak-G2 GNSS-Empfänger (Abbildung 3.3) mit einem OEM-Star Chip sind relativ kostengünstige GPS-Empfänger (ca. 1.000 EUR). Es handelt sich hierbei um L1-Empfänger, die bis zu 14 Satelliten gleichzeitig verarbeiten können. Es können GPS-, GLONASS- und SBAS-Satelliten empfangen werden. Leider kann die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Kalman-Filter Software die GLONASS-Beobachtungen noch nicht verarbeiten. Die Empfänger verfügen über einen USB-Anschluss, zwei RS232-Ports und werden über eine 12 V Spannungsquelle mit Strom versorgt. Weitere Details können aus der Tabelle 3.1 entnommen werden.

Größe	147 x 113 x 45 mm
Korrelationskanäle	14 (für GPS, Glonass und SBAS)
Kommunikation	2 RS232 Ports, 1 Input/Output Port, 1 USB Port
Temperaturbereich	- 40 ° C bis + 75 ° C
Wasserdicht	IPX7 (Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen)
Vibrationen	nach MIL-STD-810F Method 514.5, Proc. 1

Tab. 3.1: Eigenschaften des Novatel mit OEM-Star Empfänger (Gehäuse: FlexPak-G2) .

Die Novatel Empfänger verfügen über kein Userinterface und keine Speichereinheit. Es können also intern keine Daten aufgezeichnet werden. Für den Messeinsatz müssen die Empfänger mit Hilfe der mitgelieferten Software „Novatel CDU“ zuerst konfiguriert werden. Dazu müssen die Empfänger über ein USB-Kabel an den PC angeschlossen werden. In der Software kann definiert werden, welche Beobachtungstypen – z. B. NMEA-Messages, Almanachdaten, Rohdaten (Pseudorange, etc.) – über welche Schnittstelle vom Empfänger ausgegeben werden sollen. Die Aufzeichnung der Daten auf dem PC kann innerhalb der Software gestartet werden. Diese Methode wurde auf dem Messboot gewählt, um die einzelnen Messfahrten in eigene Files zu speichern. Die Beobachtungen an der Referenzstation sollten ohne Eingriffe eines Operators erfolgen. Daher wurde ein Empfänger so konfiguriert, dass die Rohdaten an die serielle Schnittstelle gesendet werden, sobald Satellitensignale empfangen werden. Die Speicherung der Daten erfolgte mit Hilfe eines Datenloggers der Firma Avisaro.

Als GPS-Antenne wurde die Aero Antenne AT575-142 ausgewählt. Es handelt sich hierbei um eine Low-Cost Ein-Frequenz-GPS-Antenne (ca. 250 EUR). Versuche auf dem Messdach der TU Wien belegten, dass die Antenne den Genauigkeitsanforderungen entspricht. Die Abbildung 3.3 zeigt auch die Antenne zur besseren Veranschaulichung. Die Antenne hat einen Durchmesser von 7.62 cm und ist 3.3 cm hoch. Unter dem schwarzen Dichtungsring befindet sich die Grundplatte, an der die Antenne über vier Schrauben befestigt ist. Wie in der Abbildung zu sehen, ist noch ein Adapter mit einem 5/8" Innengewinde zur Befestigung auf einem Masten an der Antenne befestigt.



Abb. 3.3: Novatel FlexPak-G2 Empfänger sowie GPS-Antenne AT575-142 von Aero Antenna.

3.1.2 IMU

Als IMU wurde die MEMS IMU MOTION PAK II (MP II) der Firma SYSTRON DONNER, die am Institut vorhanden ist, ausgewählt. Es ist ein inertiales Messsystem bestehend aus drei orthogonal montierten Halbleiter-Quarz Kreiselsensoren, drei orthogonal angeordneten Beschleunigungssensoren aus Silizium und einem Temperatursensor. Somit können Drehraten und lineare Beschleunigungen gemessen werden. Aus Genauigkeitsgründen und um bestmögliche Kontrolle über die Datenrate zu haben, wurde der Analogausgang des MP II verwendet. Die Bandbreite der Sensoren ist größer als 30 Hz. Das Messrauschen wird vom Hersteller mit 6 mV RMS für die Drehratenkanäle beziehungsweise 5 mV RMS für die Beschleunigungskanäle angegeben. In Tabelle 3.2 sind die wichtigsten Eigenschaften angeführt.

Tab. 3.2: Herstellerangaben des Motion PAK II von Systron Donner.

Größe	128 x 113 x 116 mm ohne Montagerahmen	
Stromversorgung	+ 11 V DC bis + 16 V DC	
Kommunikation	1 RS232 Port und Analogausgang	
	Drehraten	Beschleunigungen
Messbereich	$\pm 75^\circ/\text{sec}$	3 g
Skalierungsfaktor	0.027 V/ $^\circ/\text{sec}$	0.75 V/g
Bandbreite	> 30 Hz	> 250 Hz
Messrauschen	0.22 $^\circ/\text{s}$	0.065 m/s ²
Temperaturbereich	- 40 $^\circ$ C bis + 85 $^\circ$ C	
Vibrationen	Umgebung: 4 g RMS (20 - 2 kHz) Spitzen: 200 g PK 2 msec $\frac{1}{2}$ sin-Impuls	

Die Sensoren sind in einem kompakten und robusten Gehäuse befestigt. Zur stabilen Befestigung des Gehäuses auf einem Objekt bzw. einer Plattform wurde ein Montagerahmen mit

verschiedenen Grundplatten an der TU Graz angefertigt. Die Deckplatte des Montagerahmens hat eine 5/8" Herzschaube als Einsatz, somit kann z. B. eine GPS-Antenne zentrisch über der IMU befestigt werden. Die Abbildung 3.4 zeigt das Motion Pak II mit dem beschriebenen Montagerahmen (hier auf dem Messroboter des Institutes montiert).

Als Messwerte werden Spannungen im Bereich von ± 5 V ausgegeben. Die Umwandlung der Werte erfolgt über den NiDaq-Pad 6015 Analog-Digital Wandler. Dieser A/D Wandler hat eine Auflösung von 16 Bit und einen wählbaren Messbereich von ± 10 V, ± 5 V, ± 1 V und ± 0.1 V. Weiters verfügt der A/D Wandler über 16 Kanäle und 8 analoge Eingänge. Durch die Auflösung des NiDaq-Pad 6015 ergibt sich eine effektive Auflösung für den Messbereich von ± 10 V von 0.004 m/s² und 0.011 °/s für die beiden Kanäle. Die effektive Auflösung des A/D-Wandler liegt damit deutlich unter dem vom Hersteller angegebenen Messrauschen (siehe Tabelle 3.2). Daher war eine Verstärkung der Signale vor A/D Wandlung nicht nötig.

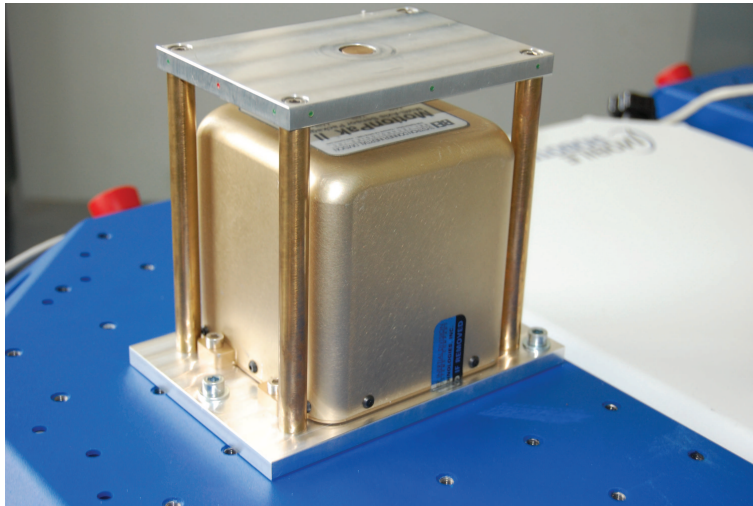


Abb. 3.4: Motion Pak II von Systron Donner mit Montagerahmen.

Die Aufzeichnung der Daten erfolgte über eine selbst programmierte Matlab-Routine. Die digitalen Spannungswerte wurden in einer bereits am Institut vorhandenen Matlab-Routine in Winkelinkremente und Geschwindigkeitsinkremente umgerechnet und für die spätere Einbindung in das Kalman Filter in ein spezielles Binär-Format konvertiert.

Das Rauschen und zeitlich variable systematische Abweichungen der IMU machen es erforderlich, die IMU Daten im Rahmen der Auswertung zu filtern und zu korrigieren. Die Abbildung 3.5 zeigt eine achtstündige Zeitreihe aus einer statischen Testmessung im Messkeller der TU Wien. In allen drei Drehratenkanälen der IMU ist ein Rauschen in der Größenordnung von ca. $2 \cdot 10^{-3}$ rad/s zu sehen (beziehungsweise ca. $1 \cdot 10^{-2}$ m/s² in Beschleunigungskanälen). Der Mittelwert der IMU-Beobachtungen müsste bei Ruhelage eigentlich 0 (reduziert um die Erddrehung und Erdbeschleunigung) ergeben. Eine Abweichung davon wird Nullpunktsfehler oder auch Bias genannt. Die Aufzeichnung zeigt nach einer Stunde eine deutliche, sprunghafte Veränderung des Bias (Flicker Noise). In anderen Zeitreihen war eine Bias Drift (kontinuierliche zeitliche Veränderung des Bias) zu finden. So werden in dieser Arbeit im Kalman Filter nicht

nur die gesuchten Größen wie Position, Geschwindigkeit und Orientierung des Objektsystems geschätzt sondern auch die Biases aller sechs Kanäle als zeitlich veränderliche Größe laufend geschätzt. Die Details zur Auswertung sind dem Abschnitt 3.3 zu entnehmen.

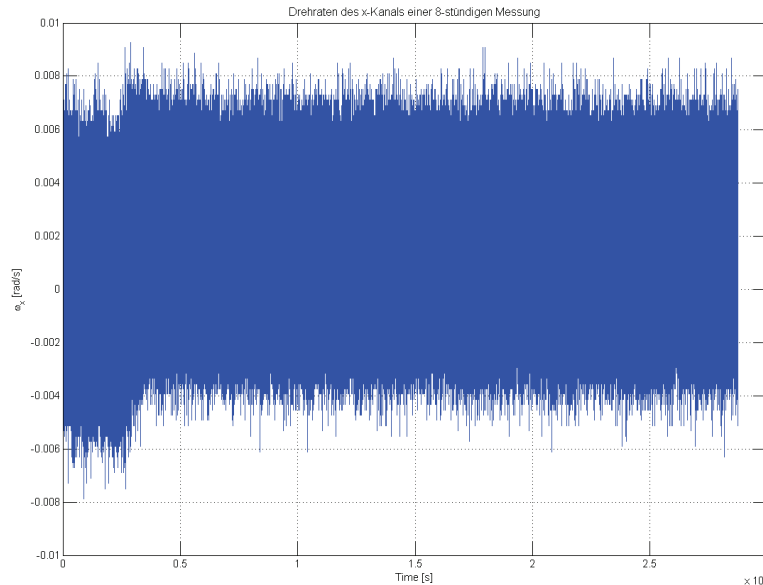


Abb. 3.5: 8-Stunden-Zeitreihe einer Testmessung der Winkelinkremente des x-Kanals.

3.1.3 Magnetometer

Ein Magnetometer wurde zusätzlich in das Messsystem aufgenommen, um eine Plausibilitätskontrolle des berechneten Kursazimuts später zu ermöglichen. Während die Längs- und Querneigung (Roll- und Nickwinkel) aufgrund der Bauweise und der Beladung des Bootes gering bleiben und die geschätzten Werte daher relativ leicht auf Plausibilität geprüft werden können, kann das Azimut α des Bootes beliebig sein und lässt sich auch mit Hilfe der geschätzten Trajektorie nur beschränkt auf Plausibilität prüfen. Auf fließenden Gewässern ist das Boot dauernd der Strömung ausgesetzt. Das Boot vollzieht eine Driftbewegung. Die tatsächliche Bewegungsrichtung weicht, wie in Abbildung 3.6 ersichtlich, aufgrund von Strömungseffekten vom Kursazimut α ab.

Die X-Sens MTi-Sensoreinheit mit integriertem 3-Achs Magnetometer, ist am Institut vorhanden, und wurde für das Experiment ebenfalls an Bord des Bootes installiert. Der MTi Sensor ist eine vollwertige IMU mit Magnetometer. So können später bei Bedarf die IMU Daten dieses Sensors auch statt der MP II Daten im Kalman Filter verwendet werden.

Zur Berechnung des Azimuts müssen die Magnetometerdaten rechnerisch horizontalisiert werden (Zobl et al., 2007), was mit Hilfe der IMU-Daten leicht möglich wäre. Zusätzlich muss die Deklination – die magnetische Missweisung – als Korrektur an die Messwerte angebracht werden.

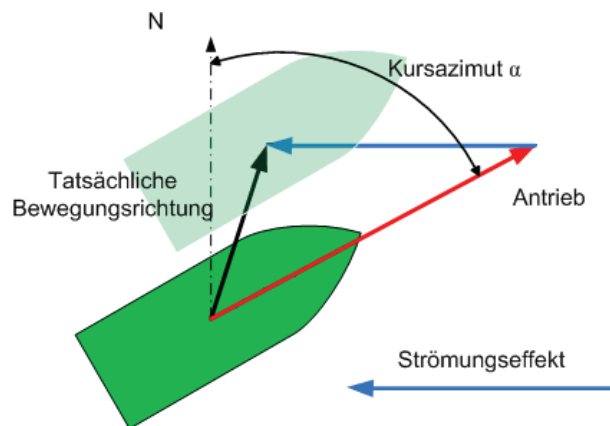


Abb. 3.6: Abweichung der tatsächlichen Bewegungsrichtung von Kursazimut aufgrund von Strömung.

Die Kommunikation erfolgt über USB-Anschluss. Für die Datenaufzeichnung steht eine Software vom Hersteller zur Verfügung. Im Sensor ist ein 16-bit A/D-Wandler integriert. Es können Rohdaten in binärer Form, kalibrierte Daten in ASCII-Format und Drehmatrizen in ASCII-Format ausgegeben werden. Die kalibrierten Daten sind die linearen Beschleunigungen sowie Drehraten, die aufgrund mechanischer Unzulänglichkeiten (z. B. Sensoren nicht exakt orthogonal ausgerichtet), rechnerisch korrigiert sind. Die Aufzeichnung der kalibrierten Daten des MTi-Sensors wird über die X-Sens Software gesteuert.

3.2 Synchronisation

Die Zeitsynchronisation der GPS- und IMU-Beobachtungen erfolgte über das PPS-Signal des GPS-Empfängers. Die Novatel-Empfänger können, so wie fast alle GPS-Empfänger, jede Sekunde einen Impuls über den I/O Port ausgeben. Das zugehörige Kabel wurde vorbereitet und an den A/D-Wandler angeschlossen. Die Abbildung 3.7 zeigt die aufgezeichneten PPS-Signale für einen Zeitraum von mehr als 10 Sekunden. Die abfallende Flanke signalisiert die volle Sekunde. Bei einer Abtastung mit 100 Hz, können der GPS-Empfänger und die IMU damit im Post-Processing auf 10 Millisekunden synchronisiert werden.

Um die genaue Startzeit der IMU-Beobachtungen den GPS-Beobachtungen zuzuordnen (Beseitigung der Mehrdeutigkeit, weil das PPS-Signal nicht die absolute Zeit in Sekunden anzeigt), wurde die Computerzeit vor dem jeweiligen Messbeginn auf die UTC-Zeit gestellt. Die UTC-Zeit kann im Programm NovAtel CDU im Clock-Window abgefragt und die CPU-Zeit automatisch angepasst werden. Die Auswertung der PPS-Signale erfolgt wiederum mit Hilfe einer am Institut vorhandenen Routine. Die Routine ist in Wieser (2005) angeführt und näher beschrieben. Die PPS-Signale werden hinsichtlich der Frequenz analysiert und ein eigener Zeitmaßstab wird aufgestellt. Sind die PPS-Signale unregelmäßig, z. B. aufgrund einer Stromunterbrechung während der A/D-Wandler Aufzeichnung, kann kein Zeitmaßstab aufgestellt werden. Die Mess-

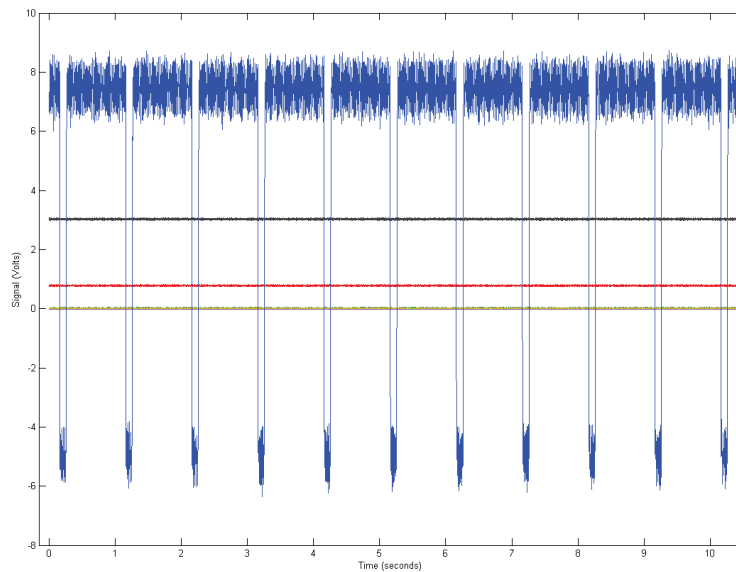


Abb. 3.7: PPS-Signale des Novatel Empfängers aufgezeichnet mit dem A/D-Wandler.

daten mussten in mehrere Files gesplittet werden, und danach konnte jeweils ein Zeitmaßstab definiert werden.

Die Implementierung einer Vorkehrung zur genauen Zeitsynchronisation des MTi Sensors mit den übrigen Sensoren war aus Zeitgründen nicht möglich. Daher wurde hier die Computerzeit als grobes Mittel zur Zeitsynchronisation verwendet. Für die feinere zeitliche Abstimmung wurden die Beschleunigungskanäle beider IMUs verwendet. Der X-Sens MTi Sensor war während der Messungen auf der Abdeckplatte der MP II IMU achsparallel befestigt. Beide IMU's wurden durch einen kurzen Impuls in Form eines kleinen Stoßes, während einer Ruhephase am Beginn und am Ende einer Messfahrt angeregt. Die MP II Messungen sind durch die GPS-Synchronisation in UTC-Zeit beziehungsweise in GPS-Zeit gegeben. Der Zeitpunkt des Ersteinsatzes des Impulses wurde in UTC ermittelt. Auch bei den X-Sens MTi Messdaten wurde der Ersteinsatz der Impulse ermittelt und mit den UTC-Zeitpunkten versehen. So konnte auch für die Magnetometer-Daten eine ausreichend genaue Zeitskala für die weitere Auswertung erstellt werden. Für den kommerziellen Einsatz wird eine automatisierte Synchronisierung benötigt.

Die Aufzeichnung der Echolotdaten wurde von Seiten der FLUSSBAU durch DI Reiner übernommen. Die FLUSSBAU verwendet die Software „HydroPro“, die eine gemeinsame Aufzeichnung von GPS-Positionen und Echolotmessungen erlaubt. Während der Messungen war daher auch ein GPS-System von Seiten der Flussbau an Bord. Die Echolotmessungen wurden in der Datenbank mit einem GPS-Zeitstempel versehen. Die Echolotdaten haben somit denselben Zeitbezug wie die GPS-, IMU- und Magnetometerdaten.

3.3 Kalmanfilter

Die eigentlichen Signale der IMU sind durch Rauschen und zeitlich variable systematische Einflüsse überlagert. Für die Verwendung der Beobachtung müssen die Messwerte gefiltert werden. Die Theorie des Kalman Filters kann z. B. aus Gelb (1974), Brown und Hwang (1997) oder Jekeli (2000) entnommen werden. Es wird eine institutseigene MATLAB Software („KF_run“) verwendet, die auf einem Extended Kalman Filter beruht (Wieser, 2004a). Vor Beginn dieser Diplomarbeit konnte das Filter folgende Beobachtungen verarbeiten:

- GPS Pseudostrecken (undifferenzierte oder doppelt-differenzierte Ein- oder Zweifrequenzdaten: $P_i^k, \nabla\Delta P_{ij}^{kl}$)
- GPS Dopplerbeobachtungen (undifferenzierte Ein- oder Zweifrequenzdaten: D_i^k)
- GPS Trägerphasenbeobachtungen (doppelt-differenzierte Ein- oder Zweifrequenzdaten: $\nabla\Delta\Phi_{ij}^{kl}$)
- IMU-Messdaten (Winkel-, und Beschleunigungssinkremente bezogen auf die mitbewegten IMU Achsen: $\Delta\mathbf{v}, \Delta\boldsymbol{\theta}$)
- Koordinatenbeobachtungen (kartesische Koordinaten im erdfesten Koordinatensystem oder ellipsoidische Höhe: \mathbf{X}_i^e, h_i)
- Geschwindigkeitsbeobachtungen (3D-Geschwindigkeitsvektor im erdfesten Koordinatensystem oder Vertikalgeschwindigkeit im lokalen Horizontsystem: $\mathbf{v}_i^e, v_{h,i}$)

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die bestehende Software von mir um folgende Optionen erweitert:

- Verarbeitung von Azimutbeobachtungen (A)
- Verarbeitung von GPS Dopplerbeobachtungen bei exzentrischer Antenne

Zuvor konnten die Dopplerbeobachtung nur berücksichtigt werden, wenn die GPS-Antenne gleichzeitig die zu schätzende Position im Kalman Filter repräsentiert. In diesem Fall ist aber die zu schätzende Position der Ursprung des b-Systems. Die GPS-Antenne ist dazu exzentrisch montiert.

Die Abbildung 3.8 zeigt den schematischen Aufbau und Ablauf des programmierten Kalman Filters für den Fall einer IMU/GPS-Lösung. Zu allererst wird im Folgenden auf die verwendeten Koordinatensysteme eingegangen. Danach wird die Einbindung der IMU-Beobachtungen, der GPS-Beobachtungen und der Azimutbeobachtungen in das Filter näher erklärt. Abschließend wird noch kurz auf den möglichen Nutzen von (fiktiven) Koordinaten- und Geschwindigkeitsbeobachtungen eingegangen.

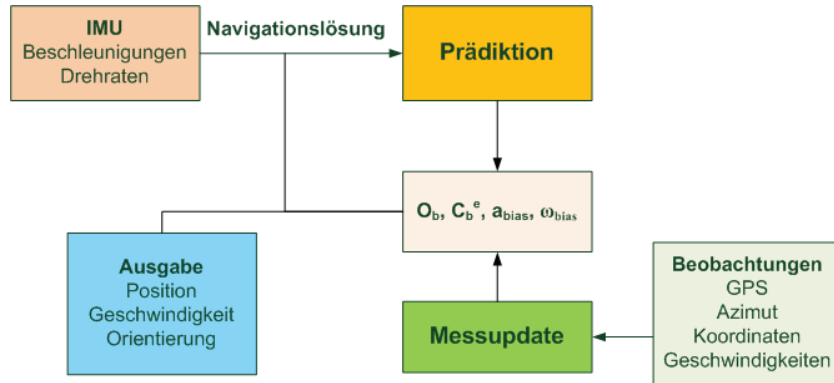


Abb. 3.8: Schematischer Aufbau des Kalmanfilters.

3.3.1 Koordinatensysteme

Wenn Koordinaten (und eventuell Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) eines Punktes mit Hilfe von `KF_run` geschätzt werden sollen, wird die Position in einem erdfesten Koordinatensystem ermittelt. Es handelt sich hierbei um ein rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem, das mit dem WGS 84 Ellipsoid verknüpft ist. Zur besseren Veranschaulichung von Trajektorien wurde auch ein „Navigations-System“ in das Filter implementiert.

Das Navigations-System ist ebenfalls ein rechtshändiges Koordinatensystem. Die z -Achse zeigt entlang der ellipsoidischen Normalen nach unten und die x -Achse zeigt in Richtung der aufsteigenden Breite. Durch die im vorliegenden Zusammenhang geringe Differenz zwischen astronomischen und ellipsoidischen Koordinaten können die Koordinaten eines Punktes \mathbf{P}_k im Navigations-Systems, also \mathbf{P}_k^n , als Nord (x), Ost (y) und negative Höhenkomponente ($-z$) interpretiert werden. Die Umrechnung zwischen beiden Koordinatensystemen erfolgt mit der Rotationsmatrix \mathbf{C}_n^e nach der Formel 3.1:

$$\mathbf{X}_k^e \Rightarrow \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda \\ H \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{C}_n^e = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & \sin \lambda & -\cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & -\cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{C}_n^e = (\mathbf{C}_e^n)^T$$

$$\Delta \mathbf{X}_{jk}^n = \mathbf{C}_e^n \cdot \Delta \mathbf{X}_{jk}^e \quad \Delta \mathbf{X}_{jk}^e = \mathbf{C}_n^e \cdot \Delta \mathbf{X}_{jk}^n$$

Für eine alleinige GPS-Auswertung reichen diese beiden Koordinatensysteme aus. Jede GPS-Antenne erhält einen eigenen Stationsnamen und die 3-D-Position (eventuell auch Geschwindigkeit und Beschleunigung) sind die zu schätzenden Elemente des Zustandsvektors. Weitere zu

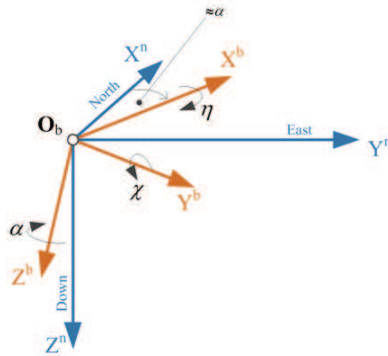


Abb. 3.9: Drehung des b-Systems gegenüber dem Navigationssystem.

schätzende Parameter könnten die Ambiguitäten, Uhrfehler und Uhrdrift sowie Korrekturparameter sein. Exzentrizitäten (z. B. Antennenhöhe) werden dabei im lokalen Horizontsystem, dem Navigations-System, definiert. Bei der Einbindung von IMU-Beobachtungen ist es notwendig, noch weitere Koordinatensysteme zu definieren.

Das „b-System“ oder Objektsystem ist wiederum ein rechtshändiges kartesisches Koordinatensystem, welches fest mit dem bewegten Objekt, hier dem Messboot, verbunden ist. Die x-Achse des Objektsystems wurde in dieser Anwendung definiert durch die Längsachse des Messbootes. Die z-Achse zeigt vertikal nach oben, wenn das Messboot horizontal liegt. Die Bewegung des Objektes kann nun durch die Position des Ursprungs \mathbf{O}_b und die Orientierung des Objekt-Koordinatensystems beschrieben werden. Die Beobachtungen einer IMU beziehen sich auf das Sensorsystem und bilden die Bewegung des Sensorsystems gegenüber dem Inertialsystem ab. Die Beziehung zwischen dem Sensorsystem und dem Objektsystem ist durch die fixe Montage der IMU gegeben. Somit können die Beobachtungen der IMU rechnerisch in das Objektkoordinatensystem transformiert werden.

Die Orientierung des Objektsystems gegenüber dem erdfesten System ist durch die Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^e gegeben. Die Berechnung dieser Matrix ist in den Formeln 3.3 angeführt, siehe z. B. Jekeli (2000):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C}_b^e &= \mathbf{C}_n^e \cdot \mathbf{C}_b^n \\
 \mathbf{C}_n^e &= \mathbf{C}_n^e(\mathbf{X}_{\mathbf{O}_b}) \\
 \mathbf{C}_b^n &= \mathbf{R}_3(-\alpha) \cdot \mathbf{R}_2(-\chi) \cdot \mathbf{R}_1(-\eta)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Die Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^n kann man mit Hilfe der drei Drehwinkel Roll- (η), Nick- (χ) und Gierwinkel (α) parametrisieren. Die Matrizen \mathbf{R}_1 und \mathbf{R}_2 und \mathbf{R}_3 werden dabei wie in Formel 3.4 berechnet.

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_1(\theta) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} & \mathbf{R}_2(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \\
\mathbf{R}_3(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & & & (3.4)
\end{aligned}$$

Die Abbildung 3.9 zeigt die Drehung des b-Systems gegenüber dem Navigations-System mit den drei Winkeln. Wenn das b-System nahezu horizontal ist, dann entspricht der Gierwinkel ungefähr dem geodätischen Azimut der x-Achse des b-Systems.

Im Kalman Filter wird die Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^e in zwei Komponenten zerlegt,

- (1) in die Näherung $(\mathbf{C}_b^e)_0$ und
- (2) in die Abweichungen $\boldsymbol{\Psi} = [\Psi_1 \quad \Psi_2 \quad \Psi_3]^T$ der Näherung von der wahren räumlichen Orientierung.

Während sich die Näherung dann aus der Prädiktion der Bootsbeziehung ergibt (und damit bekannt ist), werden die Abweichungen $\boldsymbol{\Psi}$ mit Hilfe von Beobachtungen geschätzt. Wenn auch die Abweichungen bekannt sind (ansonst wird die Prädiktion als Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^e herangezogen), lässt sich die aktuelle Orientierung des b-Systems gegenüber dem erdfesten Koordinatensystem wie in Formel 3.5 berechnen:

$$\mathbf{C}_b^e = \mathbf{R}_1(\Psi_1) \cdot \mathbf{R}_2(\Psi_2) \cdot \mathbf{R}_3(\Psi_3) \cdot (\mathbf{C}_b^e)_0 \quad (3.5)$$

Mit Hilfe der aktuellen Orientierung ausgedrückt durch die Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^e , kann in jeder Epoche mit Hilfe der (geschätzten) Koordinaten von \mathbf{O}_b^e Roll-, Nick- und Gierwinkel oder eine andere Parametrisierung (Azimut und Neigungen) der Plattform berechnet werden können.

3.3.2 Einbindung der IMU Beobachtungen

Zur Auswertung der IMU-Beobachtungen ist es notwendig, die Navigationsgleichung im erdfesten System zu lösen. Die fundamentale Beziehung, auf der die Navigationsgleichung beruht, ist in Formel 3.6 angeführt.

$$\ddot{\mathbf{X}}_P^i = \mathbf{g}^i(\mathbf{X}_P) + \mathbf{a}_P^i \quad (3.6)$$

Diese Relation verbindet die Beschleunigung $\ddot{\mathbf{X}}_P$ eines bewegten Punktes $\ddot{\mathbf{X}}_P$ mit dem Schwerebeschleunigungsvektor \mathbf{g} und dem Vektor der gemessenen spezifischen Kräfte \mathbf{a} im Punkt \mathbf{X}_P . Durch doppelte Integration der Formel 3.6 lässt sich für die Dauer während Messungen von \mathbf{a} vorliegen bei gegebener Anfangsposition und -geschwindigkeit die Position \mathbf{X}_P berechnen. Diese Lösung gilt aber nur für ein inertiales System. Für unsere Zwecke benötigen wir die Lösung der Navigationsgleichungen für Position und Geschwindigkeit im erdfesten Koordinatensystem.

In Jekeli (2000) ist die Lösung der Navigationsgleichung für das erdfeste System hergeleitet. Die Ergebnisse sind in Formel 3.7 angeführt. Eine geschlossene Lösung zur Navigationsgleichung existiert nicht, stattdessen wird in der hier verwendeten Software KF_run eine numerische Integration 3. Ordnung durchgeführt:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\dot{\mathbf{X}}_P^e(t) &= -2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \dot{\mathbf{X}}_P^e(t) + \mathbf{a}_P^e(t) + \bar{\mathbf{g}}_P^e(\mathbf{X}_P(t)) \\ \frac{d}{dt}\mathbf{X}_P^e(t) &= \dot{\mathbf{X}}_P^e(t)\end{aligned}\quad (3.7)$$

Darin ist $\boldsymbol{\Omega}_{ie}^e$ eine Matrix, die die Erdrotationsrate $\omega_e = 7.292115 \cdot 10^{-5} rad/s$ beschreibt. Der Vektor $\bar{\mathbf{g}}_P^e$ beschreibt die Gravitation des Punktes \mathbf{X}_P im Normalfeld. Mit Hilfe dieser beiden Größen werden die inertialen Messungen korrigiert, um die Bewegung des Objektes gegenüber dem erdfesten System berechnen zu können.

Für die Lösung benötigen wir aber die spezifische Kraft \mathbf{a} im erdfesten System. Deshalb müssen die Beobachtungen, die im b-System vorliegen, in das erdfeste System mittels der Formel 3.8 transformiert werden.

$$\mathbf{a}_P^e(t) = \mathbf{C}_b^e(t) \cdot \mathbf{a}_P^b(t) \quad (3.8)$$

Die Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^e wird getrennt von der Navigationslösung über die gemessenen Drehraten der Kreisel berechnet. Die Gleichung 3.9 muss dazu einmal numerisch integriert werden, was in KF_run mittels Quaternionen erfolgt.

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\mathbf{C}_b^e(t) &= \mathbf{C}_b^e(t) \boldsymbol{\Omega}_{eb}^b(t) \\ \boldsymbol{\Omega}_{eb}^b(t) &= \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_{eb}^b)_3 & (\omega_{eb}^b)_2 \\ (\omega_{eb}^b)_3 & 0 & -(\omega_{eb}^b)_1 \\ -(\omega_{eb}^b)_2 & (\omega_{eb}^b)_1 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.9)$$

Die Drehmatrix $\boldsymbol{\Omega}_{eb}^e$ zeigt die Drehbewegung des B-Systems gegenüber dem erdfesten System an. Die Drehung berechnet sich aus der gemessenen Drehrate gegenüber dem inertialen Raum, reduziert um die Erdrotation $\boldsymbol{\omega}_{ie}^e = [0, 0, \omega_e]$, siehe Formel 3.10:

$$\boldsymbol{\omega}_{eb}^b = \underbrace{\boldsymbol{\omega}_{ib}^i(t)}_{\text{Sensor}} - \mathbf{C}_e^b(t) \cdot \underbrace{\boldsymbol{\omega}_{ie}^e}_{\text{Erdrotation}} \quad (3.10)$$

In dieser Arbeit wurde das b-System theoretisch in das Sensorsystem gelegt, daher wurden die tatsächlichen Messgrößen \mathbf{a}_P^s und $\boldsymbol{\omega}_P^s$ den in den Formeln verwendeten Messgrößen \mathbf{a}_P^b und $\boldsymbol{\omega}_P^b$ gleichgesetzt. Ist eine Verdrehung der beiden Systeme zueinander gegeben, sind die entsprechenden Formeln aus Jekeli (2000) zu entnehmen.

Die Messungen der IMU sind aber von vielen Fehlern überlagert, die im Falle kostengünstiger IMUs oftmals weitaus größer als die tatsächliche Messgröße sind. Diese Fehler sind beispielsweise der Bias- oder Nullpunktsfehler und seine Drift. Bevor die Navigationslösung berechnet werden kann, müssen die rohen Beobachtungen um die Biases korrigiert werden. Dabei werden die Biases üblicherweise im Kalman Filter geschätzt.

Zusammenfassend läuft die Auswertung der IMU-Beobachtungen in folgender Reihenfolge ab:

1. Reduktion der Messwerte um den aktuellen Bias (Verwendung der besten verfügbaren Schätzwerte des Bias)
2. Aufdatierung der Orientierung: Berechnung der aktuellen Rotationsmatrix C_b^e aufgrund der gemessenen Drehraten
3. Aufdatierung der Geschwindigkeit: Berechnung der aktuellen Geschwindigkeit des b-Systems gegenüber dem erdfesten System aufgrund der gemessenen Beschleunigungen und der Rotationsmatrix C_b^e
4. Aufdatierung der Position: Berechnung der aktuellen Position im erdfesten System aufgrund der berechneten Geschwindigkeit

Die genaue Beschreibung aller vier Schritte, so wie sie in `KF_run` implementiert sind, ist in (Jekeli, 2000) zu finden und die konkrete Implementierung in `KF_run` ist in Wieser (2004b) beschrieben. Die darin beschriebene Matlab-Routine `RunNavE.m` wird zur Berechnung der Lösung der Navigationsgleichung verwendet.

Diese Routine kann bis jetzt nur Geschwindigkeitsinkremente Δv und Rotationsinkremente $\Delta\theta$ verarbeiten. Die MP II IMU liefert \mathbf{a} und $\boldsymbol{\omega}$, daher müssen die Daten vorverarbeitet werden. Das geschieht in der bereits erwähnten Konvertierungsroutine, in der die Rohdaten integriert werden und als Δv und $\Delta\theta$ abgespeichert werden.

3.3.3 Einbindung der GPS Beobachtungen

Die GPS-Beobachtungen liefern uns die aktuelle Position und Geschwindigkeit der Antenne im erdfesten System. Die Position der GPS-Antenne muss daher im b-System bekannt sein, um die unterschiedlichen Beobachtungen der Sensoren verbinden zu können. Die GPS-Beobachtungen liefern dadurch nicht nur die Position, sondern helfen, die Fehler der IMU zu schätzen und somit die Navigationslösung der IMU zu verbessern.

Code- und Phasenbeobachtungen werden durch verschiedenste Effekte beeinflusst. Die Signale sind während des Weges vom Satelliten zum Empfänger den atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt. Die Effekte der Ionosphäre können über geeignete Modelle reduziert werden. Da `KF_run` für die Prozessierung kleinräumiger Netze und kurzer Basislinien optimiert ist, wird derzeit als a-priori Modell nur das Klobuchar Modell unterstützt. Die erforderlichen Parameter für das Modell sind für jeden Messtag über FTP-Server ² frei zugänglich. Die Effekte der Troposphäre können ebenfalls über Modelle a-priori reduziert werden. In dieser Diplomarbeit wurde das Modell von Saastamoinen gewählt. Auf die Schätzung von zusätzlichen tropo- und

²z. B: NGS <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>

ionosphärischen Laufzeiteffekten wurde aufgrund der kurzen Basislinie zwischen Referenzstation und Messboot verzichtet.

Zur Berechnung der Satellitenorbits wurden die präzisen Ephemeriden vom NGS-Server für den Messtag heruntergeladen. Ebenfalls wurde berücksichtigt, ob Satelliten zum Messzeitpunkt zur Positionsbestimmung nicht verwendet werden sollten³.

Das Kalman Filter würde auch die verschiedenen GPS-Antennentypen berücksichtigen, denn die Antennen unterscheiden sich bezüglich des Antennenreferenzpunktes (ARP), des Phasenzentrums und der Phasenzentrumsvariationen. Ein Service⁴ von NGS bietet freizugänglich die Resultate von Antennenkalibrierungen für viele der gebräuchlichsten geodätischen Antennen an. Hierbei wird genau angeführt, wo der ARP liegt und wie die Signale aus verschiedenen Elevationen verzögert werden. Für die eingesetzte Low-Cost-Antenne von AERO Antenna steht mit jetzigem Stand noch kein Kalibrierungsfile zur Verfügung. Daher wurden alle Werte mit Null angesetzt.

Der verwendete Empfänger und die Empfänger-Antennen-Kombination wird ebenfalls berücksichtigt. Es müssen Gewichte für die verschiedenen Beobachtungstypen eingeführt werden. Die Gewichtung der Messdaten erfolgte im Rahmen dieser Diplomarbeit elevationsabhängig mit vom Nutzer vorgegebenen Standardabweichungen σ_0 für eine Beobachtung im Zenit. Die Varianz einer Beobachtung mit der Elevation E lässt sich über $\sigma_i^2 = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2(E)}$ berechnen. Die GPS-Beobachtungen müssen im Kalman Filter in RINEX-Files übergeben werden.

Die Doppler-Beobachtungen stellen besonders für die Schätzung der Geschwindigkeiten eine wichtige Beobachtung dar. Die erreichbare Genauigkeit durch die Schätzung der Geschwindigkeit mit Hilfe von Doppler-Beobachtungen liegt bei 2-4 mm/s (horizontal) und <10 mm/s (vertikal) (Wieser, 2007b). Die derzeitige Implementierung des Kalman-Filters erlaubt nur zentrische Doppler-Beobachtungen, d. h. dass die zuschätzende Geschwindigkeit sich auf das Phasenzentrum bezieht. Bei der GPS und IMU Kombination soll aber nicht die Position und die Geschwindigkeit der GPS-Antenne geschätzt werden, sondern des Ursprung des b-Systems. Im Hinblick auf die erreichbaren Genauigkeiten bei der Geschwindigkeitsschätzung wurde die bestehende Software erweitert, um exzentrische Doppler-Beobachtungen verarbeiten zu können.

Exzentrischen Doppler-Beobachtungen

Zur Einbindung von Doppler-Beobachtung in das Kalman Filter muss zuvor die Beobachtungsgleichungen aufgestellt sowie die partiellen Ableitungen nach den einzelnen Elementen des Zustandsvektors gebildet werden. Die Beobachtungsgleichung für zentrische Doppler-Beobachtungen ist in Gleichung 3.11 angeführt (Wieser, 2007b). Darin sind ebenfalls die partiellen Ableitungen nach der geschätzten Position und Geschwindigkeit des GPS-Empfängers, sowie Uhrdrift δt , Troposphären- \dot{T}_r^s und Ionosphärenparameter \dot{I}_r^s angeführt.

³<http://adn.agi.com/SatelliteOutageCalendar/SOFCalendar.aspx>

⁴<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>

$$\begin{aligned}
(D_r^s(t_r))^{comp} &= - \left[(\mathbf{I}_3 - \Delta t_r^s \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e) \dot{\mathbf{X}}_s^e(t^s) - \dot{\mathbf{X}}_r^e(t_r) \right]^T \cdot \mathbf{a}_{rs}^e(t_r) \cdot (1 - \delta \dot{t}_r(t_r)) \\
&\quad - c \cdot (1 - \delta \dot{t}_r(t_r)) \cdot \delta \dot{t}_r(t_r) + c \cdot \delta \dot{t}^s(t^s) \\
&\quad - \left(\dot{I}_r^s(t_r) \right)^{mod} + \left(\dot{I}_r^s(t_r) \right)^{mod} - \delta \dot{r}_r^s(t_r)
\end{aligned} \tag{3.11}$$

mit dem Einheitsvektor der direkten Verbindung vom Receiver r zum Satelliten s im erdfesten System zum Empfangszeitpunkt t_r :

$$\mathbf{a}_{rs}^e(t_r) := \frac{[\mathbf{I}_3 - \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \Delta t_r^s] \mathbf{X}_s^e(t_s) - \mathbf{X}_r^e(t_r)}{\|[\mathbf{I}_3 - \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \Delta t_r^s] \mathbf{X}_s^e(t_s) - \mathbf{X}_r^e(t_r)\|} \tag{3.12}$$

Der erste Term der rechten Seite der Gleichung 3.11 zeigt die relative Geschwindigkeit zwischen einem Satellit s und dem Empfänger r. Für die exzentrischen Doppler-Beobachtungen muss die Gleichungen bezüglich der Position \mathbf{X}_r^e beziehungsweise Geschwindigkeit $\dot{\mathbf{X}}_r^e$ des Receivers adaptiert werden. Im Falle einer GPS/IMU Kombination ist die gesuchte Größe der Ursprung des b-Systems $\mathbf{X}_{0_b}^e$. Die GPS-Antenne ist fix im b-System definiert durch den Offset \mathbf{X}_r^b . Die Position der Antenne lässt sich im erdfesten System durch Kenntnis der Rotation des b-Systems gegenüber dem erdfesten System wie folgt angeben:

$$\begin{aligned}
\mathbf{X}_r^e &= \mathbf{X}_{0_b}^e + \mathbf{C}_b^e \cdot \mathbf{X}_r^b \\
\Rightarrow \dot{\mathbf{X}}_r^e &= \dot{\mathbf{X}}_{0_b}^e + \dot{\mathbf{C}}_b^e \cdot \mathbf{X}_r^b + \mathbf{C}_b^e \cdot \underbrace{\dot{\mathbf{X}}_r^b}_0
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Die GPS-Antenne ist fix im b-System und daher ist in diesem System die Geschwindigkeit gleich Null. Der dritte Term der rechten Seite entfällt deshalb. Die Berechnung der Matrix $\dot{\mathbf{C}}_b^e$ erfolgt, mit Formel 3.9. 3.13 in 3.11 eingesetzt, ergibt die Beobachtungsgleichung für exzentrische Doppler-Beobachtungen:

$$\begin{aligned}
(D_r^s(t_r))^{comp} &= - \left\{ (\mathbf{I}_3 - \Delta t_r^s \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e) \dot{\mathbf{X}}_s^e(t^s) - \left[\dot{\mathbf{X}}_{0_b}^e(t_r) + \dot{\mathbf{C}}_b^e(t_r) \cdot \mathbf{X}_r^b \right] \right\}^T \cdot \mathbf{a}_{rs}^e(t_r) \cdot (1 - \delta \dot{t}_r(t_r)) \\
&\quad - c \cdot (1 - \delta \dot{t}_r(t_r)) \cdot \delta \dot{t}_r(t_r) + c \cdot \delta \dot{t}^s(t^s) - \left(\dot{I}_r^s(t_r) \right)^{mod} + \left(\dot{I}_r^s(t_r) \right)^{mod} - \delta \dot{r}_r^s(t_r) \\
\mathbf{a}_{rs}^e(t_r) &:= \frac{[\mathbf{I}_3 - \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \Delta t_r^s] \mathbf{X}_s^e(t_s) - \left[\mathbf{X}_{0_b}^e(t_r) + \mathbf{C}_b^e(t_r) \cdot \mathbf{X}_r^b \right]}{\|[\mathbf{I}_3 - \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \Delta t_r^s] \mathbf{X}_s^e(t_s) - \left[\mathbf{X}_{0_b}^e(t_r) + \mathbf{C}_b^e(t_r) \cdot \mathbf{X}_r^b \right]\|}
\end{aligned}$$

Für die Einbindung in das Kalman Filter müssen die linearisierten Beobachtungsgleichungen neu definiert werden. Hierbei müssen die partiellen Ableitungen nach den Elementen des Zustandsvektors $(\mathbf{X}_{0_b}^e, \dot{\mathbf{X}}_{0_b}^e, \Psi, \delta \dot{t}_r)$ adaptiert werden, wobei die Ableitungen in KF_run für eine jede Beobachtung zu einer jeden Epoche numerisch gebildet werden.

3.3.4 Einbindung von Azimutbeobachtungen

Die Position und die Geschwindigkeit des Bootes können durch GPS-Beobachtungen bestimmt werden. Die Drehung um die z-Achse kann mit nur einer GPS-Antenne nicht beobachtet werden. Daher ist der Bias des z-Kreisel (z-Achse ungefähr vertikal) nicht beobachtbar, während keine signifikanten Beschleunigungen und Drehungen des Bootes stattfinden. Die Navigationslösung kann in solchen Situationen eine fälschliche Drehung des Bootes anzeigen. Diesem Phänomen kann mit Hilfe der Azimutbeobachtungen entgegengewirkt werden. Zur Bestimmung des Azimuts wird ein 3-D Magnetfeldsensor eingesetzt.

Das magnetische Azimut wird aus den Magnetometerdaten m_x und m_y des x- und des y-Kanals über die Formel 3.14 ermittelt (Zobl et al., 2007).

$$A_{magn} = \arctan\left(\frac{m_y}{m_x}\right) \quad (3.14)$$

Diese Formel gilt streng genommen nur dann, wenn der Sensor horizontiert ist. Die Magnetometerdaten können natürlich auch rechnerisch horizontiert werden. Weiters gilt, dass die x-Achse des Magnetometersensors parallel zur x-Achse des b-Systems ist. Die Neigung des Bootes ist a-priori nicht bekannt. In unserem Fall müsste daher die Horizontierung der Magnetometerdaten im Rahmen der Datenauswertung im KF_run-Programm erfolgen. Die erforderliche Adaption war aber nicht nötig, da das Boot während der Messung genähert horizontiert war. Die Abweichungen des Azimuts, wenn Quer- und Längsneigung des Bootes und des Sensors nicht berücksichtigt werden, sind für diese Anwendung vernachlässigbar.

Das magnetische Azimut muss nun um die Deklination, die Missweisung zwischen magnetisch Nord und ellipsoidisch Nord, korrigiert werden. Die Deklination für das Messgebiet kann über die Homepage von National Oceanic and Atmospheric Administration⁵ abgefragt werden und beträgt für das Messgebiet 2° 42' E. Der Betrag der Deklination muss demnach zu dem gemessenen magnetischen Azimut addiert werden.

Der Einfachheit halber wurde für die Implementierung der Azimutbeobachtungen in der Software KF_run in einer Unterfunktion „KF_mkoCRD“ vorgesehen. Die Azimutbeobachtungen mussten völlig neu in die Software eingearbeitet werden. Dazu mussten die Einlesealgorithmen, Ausgabealgorithmen (Darstellung der Azimutbeobachtungen im Log-File) und verschiedene Darstellungsalgorithmen erweitert werden. Die Beobachtungsgleichung musste aufgestellt, linearisiert und in die betreffenden Berechnungsprogramme eingebaut werden.

Die Beobachtungsgleichung für das geodätische Azimut lautet:

$$\tan(A) = \frac{x_{e^b}^n}{y_{e^b}^n} = \frac{C_b^n(2,1)}{C_b^n(1,1)} \quad (3.15)$$

$$\text{wegen } \mathbf{e}_{x_b}^n = \mathbf{C}_b^n \cdot \mathbf{e}_{x_b}^b \text{ mit } \mathbf{e}_{x_b}^b = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (3.16)$$

⁵<http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/Declination.jsp>

Es wird damit die Richtung der x-Achse des b-Systems gegenüber der xz-Ebene des Navigations-Systems (also gegenüber der Meridianebene) bestimmt. Die Drehmatrix \mathbf{C}_b^n lässt sich wie in Formel 3.17 berechnen, wobei sich die Matrix \mathbf{C}_e^n aus der aktuellen Position des Ursprungs des b-Systems berechnet. In die Beobachtungsgleichung für das Azimut gehen somit die Position \mathbf{X} und die Fehler Ψ der räumlichen Drehung als Elemente des Zustandsvektors ein.

$$\mathbf{C}_b^n = \mathbf{C}_e^n \mathbf{C}_b^e \quad (3.17)$$

Die Linearisierung der Beobachtungsgleichung wurde durch numerische Differentiation gebildet. Die entsprechende Zeile der Matrix \mathbf{H} der linearisierten Beobachtungen ist in der Formel 3.18 angegeben.

$$\mathbf{H} = \left[\dots \quad \frac{\delta A}{\delta X_1} \quad \frac{\delta A}{\delta X_2} \quad \frac{\delta A}{\delta X_3} \quad \dots \quad \frac{\delta A}{\delta \Psi_1} \quad \frac{\delta A}{\delta \Psi_2} \quad \frac{\delta A}{\delta \Psi_3} \quad \dots \right] \quad (3.18)$$

Dazu wird in jeder Epoche das Azimut mit Hilfe der Formel 3.17 und 3.15 aus den aktuellen Elementen des Zustandsvektor berechnet. Für die numerische Differentiation werden zusätzlich noch kleine Zuschläge einzeln an jedes Element des Zustandsvektors angebracht und neuerlich das Azimut berechnet. Die partielle Ableitung nach dem jeweiligen Element berechnet sich aus der Differenz zwischen dem ursprünglichen Azimut und dem Azimut, berechnet aus dem jeweiligen Zuschlag zum Zustandsvektor, gebrochen durch den jeweiligen Zuschlag.

Zur Probe wurde eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Dabei wurde für die Position ein Punkt im Messgebiet gewählt und ein Azimut von -126° sowie das Boot als horizontal angenommen, wobei die z-Achse des Sensors aber nach oben weist. Es zeigte sich, dass nach wenigen Epochen eine fehlerhafte Anfangsorientierung durch die Einbindung von Azimutbeobachtungen behoben werden kann.

Die angegebene Beobachtungsgleichung und deren Linearisierung wurden in das Filter eingearbeitet. Die Standardabweichung der beobachteten Azimuts wurde einheitlich mit $\sigma_A = 3^\circ$ angesetzt. Die daraus entstandene Version von KF_run berücksichtigt Azimutbeobachtungen nur, wenn IMU-Messdaten vorliegen, weil nur in diesem Fall in KF_run auch die Orientierung des b-Systems geschätzt wird.

3.3.5 Nutzen der Koordinaten- und Geschwindigkeitsbeobachtungen

In KF_run können Koordinatenbeobachtungen in die Auswertung eingeführt werden. Neben den Koordinaten können auch die Geschwindigkeit, die ellipsoidische Höhe oder die vertikale Geschwindigkeit eingeführt werden. Jede solche Beobachtung kann für eine bestimmte Epoche oder für einen ganzen Zeitraum definiert werden. Zur Stabilisierung der geschätzten Trajektorie kann es nützlich sein, fiktive Beobachtungen einzuführen, etwa um die Information einzubringen, dass die Vertikalgeschwindigkeit einen gewissen Absolutbetrag nicht übersteigt.

Für diese Anwendung eignet sich im Speziellen die ellipsoidische Höhe mit einer Standardabweichung von 20 cm vorzugeben. Aufgrund der Wellen erfährt das Boot eine ständige Auf- und Abbewegung davon abgesehen ist die Höhe aber praktisch konstant. Die Amplitude der

Höhenvariation wurde aus der GPS-Lösung ermittelt und in die GPS-IMU Kombination als zusätzliche fiktive Beobachtung zur Stabilisierung der Lösung eingeführt.

3.4 Verortung der Echolotdaten

Als Ergebnis des Kalman-Filters erhält man die Position, die Geschwindigkeit und die räumliche Orientierung des b-Systems gegenüber dem erdfesten Koordinatensystem für jede Epoche. Die Verortung der Echolotdaten beruht darauf, dass das Echolot wiederum fix mit dem b-System verbunden ist. Durch die Kenntnis der Position des Echolotschwingers $\mathbf{X}_{Echolot}^b$ im b-System und der Orientierung \mathbf{C}_b^e können die gemessenen Tiefen verortet werden.

Die Verortung der Daten erfolgt in zwei Schritten. Als erstes wird die Position des Echolotschwingers \mathbf{X}_S^e im erdfesten System bestimmt. Dafür ist eine Transformation in das erdfeste System nötig.

$$\mathbf{X}_S^e = \mathbf{C}_b^e \cdot \mathbf{X}_S^b + \mathbf{X}_0^e \quad (3.19)$$

Danach erfolgt die Transformation in das Landeskoordinatensystem. Dazu werden die kartesischen Koordinaten mit Lagerung ITRF 2005 über eine 7-Parameter Transformation⁶ in kartesische Koordinaten mit Lagerung MGI umgerechnet. Anschließend wurden die ellipsoidischen Koordinaten (Länge, Breite, Höhe) berechnet und in das Landeskoordinatensystem nach Gauß-Krüger verebnet. Schlussendlich ist die Position des Echolotschwingers im Landeskoordinatensystem in Rechts- und Hochwert sowie der ellipsoidischen Höhe bekannt.

Unter der Annahme, dass sich der Echolotstrahl lotrecht im Wasser ausbreitet, müsste nur noch die gemessene Tiefe von der Höhe des Schwingers subtrahiert werden, um die Höhe des abgetasteten Bereiches an der Gewässersohle zu erhalten. In unserem Fall können wir nicht von einer lotrechten Ausbreitung des Echolotimpulses ausgehen, daher nützen wir die Kenntnis der Neigungen des Bootes aus, um die tatsächliche Position des Footprints \mathbf{P}_L zu bestimmen.

Der Rollwinkel η (Drehung um die x-Achse oder Querneigung des Bootes), der Nickwinkel χ (Drehung um die y-Achse oder Längsneigung des Bootes) und der Gierwinkel α müssen noch aus der Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^n extrahiert werden:

$$\begin{aligned} \tan(\eta) &= \frac{\mathbf{C}_b^n(3, 2)}{\mathbf{C}_b^n(3, 3)} \\ \sin(\chi) &= -\frac{\mathbf{C}_b^n(3, 1)}{\mathbf{C}_b^n(3, 3)} \\ \tan(\alpha) &= \frac{\mathbf{C}_b^n(2, 1)}{\mathbf{C}_b^n(1, 1)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

⁶Der verwendete Parametersatz gilt für die Umgebung Graz und wurde für dieses Messgebiet als Transformationsparametersatz von ITRF 2005 zu MGI übernommen. Bei Bedarf könnte auch mit lokal angepassten Transformationsparametern gerechnet werden.

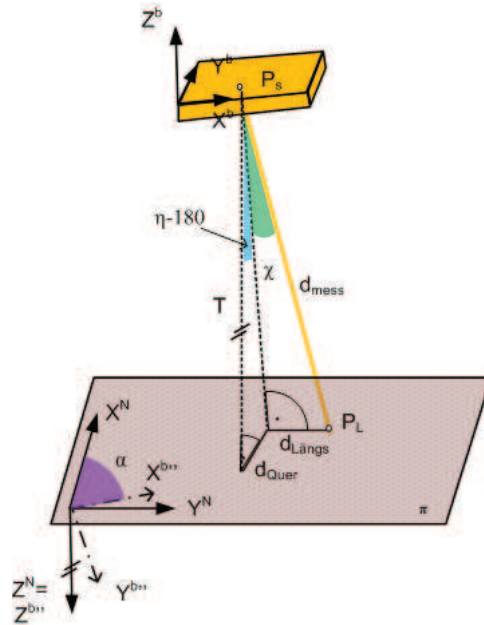


Abb. 3.10: Prinzip-Skizze zur Verortung der Echolotaufnahmen durch die geschätzten Roll-, Nick und Gierwinkeln.

Die Abbildung 3.10 zeigt schematisch die Auswirkungen von den drei Winkeln auf die Echolotmessung. Anhand der geschätzten Roll- und Nickneigungen lassen sich Korrekturwerte d_{Quer} und $d_{Längs}$ an der Gewässersohle berechnen.

$$\begin{aligned}
 d_{Längs} &= \sin(\eta) \cdot d_{mess} \\
 d_{Quer} &= \cos(\eta) \cdot \sin(\chi) \cdot d_{mess} \\
 T &= \cos(\eta) \cdot \cos(\chi) \cdot d_{mess}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Diese Korrekturen müssen schlussendlich mittels des Gierwinkels α in das übergeordnete System (Landeskoordinatensystem) wie in Formel 3.22 transformiert und an die Schwingerposition angebracht werden.

$$\begin{aligned}
 x_L &= x_s + \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_{Längs} \\ d_{Quer} \end{bmatrix} \\
 y_L &= y_s + \begin{bmatrix} \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_{Längs} \\ d_{Quer} \end{bmatrix} \\
 H_L &= H_s - T
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Zusammenfassend werden mit Hilfe der IMU-Beobachtungen die Position und die Orientierung

des Bootes von Epoche zu Epoche prädiziert. Anhand der GPS-Beobachtungen, der Azimutbeobachtungen sowie der (fiktiven) Koordinaten- und Geschwindigkeitsbeobachtungen werden die wahrscheinlichsten Werte für die Elemente des Zustandsvektors geschätzt, wenn Beobachtungen vorliegen, andernfalls wird der prädizierte Zustandsvektor aus den IMU-Messdaten als bester Schätzwert übernommen. Im Zuge der Schätzung werden Bias-Korrekturen für die Beschleunigungs- und die Drehratenkanäle mitgeschätzt. Die für die Prädiktion (IMU-Datenauswertung) verwendeten Biases werden vor der nächsten Epoche um die geschätzten Korrekturen verbessert.

Das Ergebnis des Kalman-Filters ist darüber hinaus die vollständige Positions- und Orientierungsinformation des Messbootes in jeder Epoche. Aus der Position und der Orientierung lässt sich die Position des Echolotschwingers im erdfesten System berechnen. Diese Position wird in ein ebenes Landeskoordinatensystem umgerechnet. Anhand der geschätzten Orientierung des Messbootes lassen sich die Neigungen des Bootes extrahieren. Die Neigungen und das Kursazimut werden zur Verortung des Bodenpunktes des Echolotstrahls verwendet.

4 Charakterisierung der IMU mittels Allan-Varianz

Eine Inertiale Messeinheit (IMU) ist ein zeitabhängiges Messsystem, deren Abweichungen bereits nach kurzer Zeit (einige Sekunden) Koordinatenfehler von mehreren 100 m bis mehreren Kilometern verursachen können, wenn sie nicht berücksichtigt werden. Durch die Integration der beobachteten Messwerte werden auch die Fehler der IMU mit aufintegriert. In der Praxis ist es daher notwendig, eine Charakterisierung und Quantifizierung der Fehlertypen der vorliegenden IMU durchzuführen und die Abweichungen möglichst laufend mitzuschätzen. Die Fehleridentifikation kann mittels folgender Ansätze erfolgen:

- Autokorrelationsfunktion
- Leistungsdichtespektrum (PSD)
- Modellanpassung (z. B. ARMA)
- Allan-Varianz

Der Autokorrelationsfunktionsansatz ist in der Praxis nicht gebräuchlich, da eine sehr lange Beobachtungsdauer für die Auswertung nötig ist (Hou, 2004), im Extremfall kann diese theoretisch sogar die reale Lebensdauer einer IMU übersteigen. In der Praxis wird daher häufig das Leistungsdichtespektrum berechnet und durch Analyse sowie Interpretation des Spektrums abgeschätzt, welche Terme wesentlich sind (z. B. Quantisierung, Random Walk, ..) und wie sie quantifiziert werden können. Bei der Modellanpassung werden z.B. die Koeffizienten eines Autoregressive Moving Average (ARMA) Modells geschätzt, wobei die Autokovarianzfunktion der untersuchten Zeitreihe in Beziehung zu Koeffizienten einer Differenzgleichung gebracht wird (Hou, 2004).

Die Allan-Varianz wurde erstmals 1966 von DAVID ALLAN verwendet, um die Stabilität von Oszillatoren zu untersuchen. Die Allan-Varianz wurde daraufhin vor allem zur Beschreibung der Stabilität von Phase und Frequenz von hochgenauen Oszillatoren verwendet. In den 80er-Jahren wurde dann die Methode aufgrund der großen Analogie auf die Inertial-Messsysteme übertragen. 1983 konnte M. TEHRANI zeigen, wie die spektrale Leistungsdichte und die Allan-Varianz zusammenhängen (Tehrani, 1983). 1988 wurde die Methode der Allan-Varianz als Standard zur Identifikation von IMU-Fehlertermen und Quantifizierung von der IEEE eingeführt, IEEE Std 647 (2006). Die Allan-Varianz ist eine sehr einfache und leicht zugängliche Methode zur Charakterisierung von zeitabhängigen Fehlern einer IMU und sie wird daher in dieser Arbeit verwendet.

4.1 Berechnung der Allan-Varianz

Es wird angenommen, dass M aufeinander folgende Datenpunkte eines IMU Beschleunigungskanals mit einer zeitlichen Auflösung von Δt vorliegen. Nun wird ein Zeitintervall $\tau = k \cdot \Delta t$, $k \in \mathbb{N}$ gewählt und die Differenz aufeinander folgender Werte a im Abstand von τ Sekunden berechnet:

$$\begin{aligned} \xi_i &:= a_{1+(i-1)k} \quad \text{mit } k = \frac{\tau}{\Delta t}, \quad i = 1, 2, \dots, N \leq 1 + \frac{M-1}{k} \\ y_i &:= \frac{1}{\tau} (\xi_{i+1} - \xi_i) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Es können so $N-1$ Einfachdifferenzen gebildet werden. Jedes Element, außer dem ersten und dem letzten, wird zweimal verwendet. Die Allan Varianz wird aus den $N-2$ Doppeldifferenzen wie folgt berechnet, Allan et al. (1997):

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i = \frac{1}{\tau} (\xi_{i+2} - 2\xi_{i+1} + \xi_i) \quad (4.2)$$

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)} \sum_{i=1}^{N-2} \Delta y_i^2 \quad (4.3)$$

Grundsätzlich steigt mit Anzahl N der verwendeten Datenpunkte die Genauigkeit der Allan-Varianz.

Für die Berechnung der Allan-Varianz für die Drehraten muss in 4.1 a durch ω ersetzt werden. Die anderen Formeln können dann unverändert angewendet werden.

Die Fehleridentifikation beruht darauf, dass unterschiedliche Abweitungstypen sich in unterschiedlichen Anstiegen der Allan-Standardabweichung im Log-Log Plot ($\log \sigma_A$ gegenüber $\log \tau$) zeigen. Für nähere Details sei auf El-Sheimy et al. (2008) hingewiesen. In Hou (2004) wird eine Fehlercharakterisierung einer MP II IMU vorgenommen, die auch im Rahmen dieser Diplomarbeit benutzt wird. Die Formeln in beiden Publikationen unterscheiden sich von den hier angeführten Formeln in der Hinsicht, dass die integrierten Messdaten Δv und $\Delta \theta$ anstelle der spezifischen Kräfte a und Drehraten ω verwendet wurden und daher einen Differentiationsschritt mehr erfordern.

Hier wird in der Folge nur beschrieben, wie sich weißes Rauschen und Random Walk von a und ω in der Allan Standardabweichung zeigen und wie die betreffenden Rauschdichten der graphischen Darstellung entnommen werden können.

4.2 Weißes Rauschen

Die Testgröße der Allan Varianz kann auch als empirische Varianz unter der Annahme, dass nur weißes Rauschen in den Δy_i vorliegt, angeschrieben werden. Diese Varianz ergibt sich unter der zusätzlichen Annahme $E\{\Delta y_i\} = 0$ aus:

$$s_{\Delta y_i}^2 = \frac{1}{(N-2)} \sum_{i=1}^{N-2} \Delta y_i^2 = 2\sigma_A^2(\tau) \quad (4.4)$$

Diese Varianz der Doppeldifferenzen kann durch Varianzfortpflanzung auf 4.2 unter Berücksichtigung von 4.1 auf die Varianz der ursprünglichen Messgröße x (Beschleunigung und Drehraten) zurückgeführt werden,

$$\sigma_{\Delta y_i}^2 = \frac{1}{\tau^2} (\sigma_{\xi_{i+2}}^2 + 4\sigma_{\xi_{i+1}}^2 + \sigma_{\xi_i}^2) = \frac{6}{\tau} \sigma_x^2 \quad (4.5)$$

wobei angenommen wurde, dass $\sigma_{\xi_i}^2 = \sigma_x^2 \forall i$. Aus dem Vergleich der rechten Seiten der Formeln 4.4 und 4.5 kann der einfache Zusammenhang zwischen der Allan-Standardabweichung σ_A und der Standardabweichung σ_x des weißen Rauschens abgeleitet werden:

$$\sigma_A(\tau) = \frac{\sqrt{3}}{\tau} \sigma_x \quad (4.6)$$

wobei angenommen wurde, dass die Datenreihe hinreichend umfangreich ist, sodass die empirische und die theoretische Varianz gleichgesetzt werden können ($s_{\Delta y_i}^2 = \sigma_{\Delta y_i}^2$).

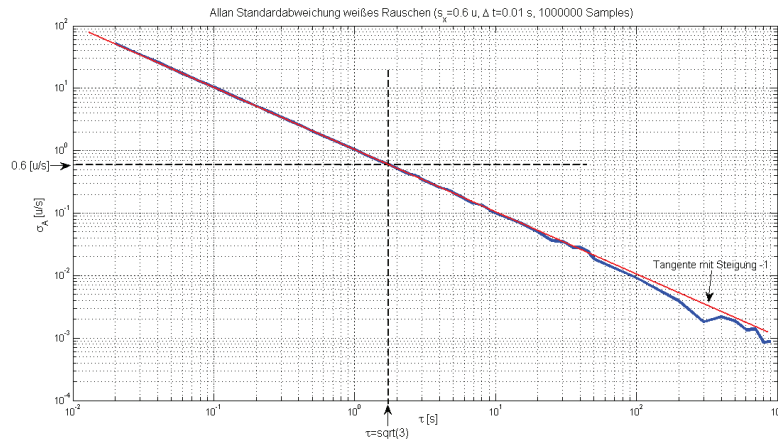


Abbildung 4.1: Bestimmung der Standardabweichung des weißen Rauschens aus synthetischen Daten (Simulation: $s_x = 0.6$ u, $\Delta t = 0.01$ s).

In einer logarithmischen Darstellung von σ_A gegenüber τ erscheint daher das weiße Rauschen mit einem Anstieg von -1. Zur Bestimmung des weißen Rauschens wird eine Tangente mit der Steigung -1 an die Kurve, wie in Abbildung 4.1 zu sehen, gelegt. Der Wert an der Stelle $\tau = \sqrt{3}$ Sekunden entspricht der Standardabweichung σ_x . Zur Berechnung der spektralen

Rauschdichte – wie sie in KF_run als Parameter benötigt wird – muss die Abtastrate $\frac{1}{\Delta t}$ mit eingebunden werden:

$$q_x = \sigma_x^2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\Delta t}} = \sigma_x^2 \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

4.3 Random Walk

Der Zusammenhang zwischen der Allan-Varianz und der spektralen Rauschdichte des Random Walk der Beschleunigungen und der Drehraten wird mit Hilfe folgender Formeln hergeleitet. Dazu wird Formel 4.2 mit Hilfe von $\Delta_1 := \xi_{i+1} - \xi_i$ und $\Delta_2 := \xi_{i+2} - \xi_{i+1}$ umgeschrieben.

$$\begin{aligned} \Delta y_i &= \frac{1}{\tau} \left(\underbrace{\xi_i + \Delta_1 + \Delta_2}_{\xi_{i+2}} - 2 \underbrace{(\xi_i + \Delta_1)}_{\xi_{i+1}} + \xi_i \right) \\ \Delta y_i &= \frac{1}{\tau} (\Delta_2 - \Delta_1) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Wiederum wird die theoretische Varianz der Testgröße gebildet und kann wie folgt angeschrieben werden:

$$\sigma_{\Delta y_i}^2 = \frac{1}{\tau^2} (\sigma_{\Delta_2}^2 + \sigma_{\Delta_1}^2) \quad (4.9)$$

Mit der spektralen Rauschdichte q_{rw} ergibt sich die Varianz der Inkremente $\sigma_{\Delta_i}^2$ zu

$$\sigma_{\Delta_i}^2 = \tau \cdot q_{rw} \quad (4.10)$$

und daher

$$\sigma_{\Delta y_i}^2 = \frac{1}{\tau^2} (\tau q_{rw,x} + \tau q_{rw,x}) = \frac{2}{\tau} q_{rw} \quad (4.11)$$

Daraus ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Allan-Varianz σ_A^2 und der spektralen Rauschdichte q_{rw} des Random Walk zu:

$$\sigma_A(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \sqrt{q_{rw}}$$

Random Walk zeigt sich in der logarithmischen Darstellung der Allan-Standardabweichung durch einen charakteristischen Anstieg von -1/2. Die spektrale Dichte kann direkt an der Stelle $\tau = 1$ (Sekunde) abgelesen werden. Dazu muss eine Tangente mit der Steigung -1/2 an die Kurve angepasst werden.

4.4 Experimentelle Bestimmung der Rauschdichten des MP II

Eine Testmessung wurde mit der IMU MP II im Messkeller der TU Wien am 13.11.2010 durchgeführt. Die IMU wurde fix auf einem Messpfeiler montiert. Die Beobachtungsdauer betrug fast 8 Stunden, wobei eine Datenrate von 100 Hz zur Aufzeichnung verwendet wurde. Die IMU wurde über einen + 12 V Akku mit Strom versorgt. Exemplarisch sind die Rohdaten in Abbildung 4.2 für alle drei Beschleunigungskanäle dargestellt.

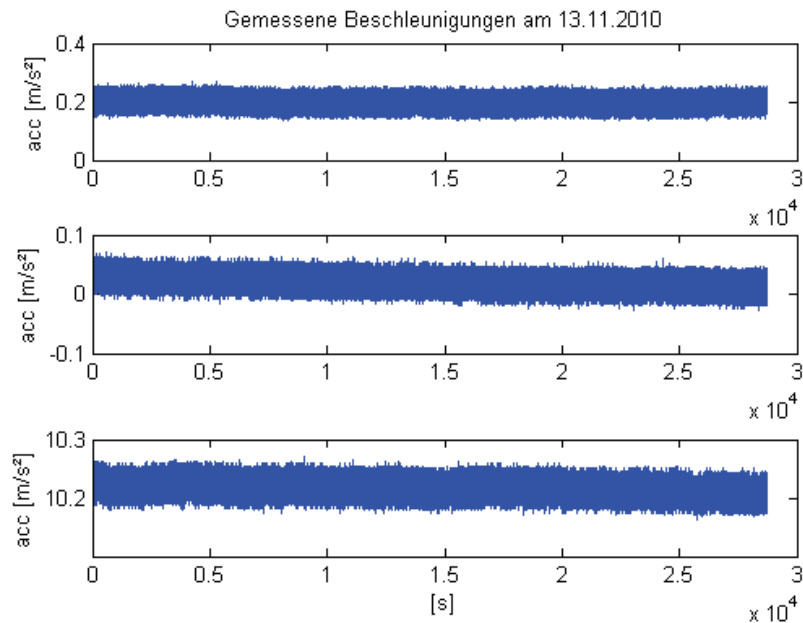


Abb. 4.2: Gemessene Beschleunigungen am 13.11.2010 mit einer Auflösung von 100 Hz.

Aus den Rohdaten wurde, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, die Allan-Varianz berechnet. Danach wurde die Standardabweichung gegenüber der Clusterzeit τ logarithmisch dargestellt. Die Ergebnisse für die Kreiselensoren und für die Beschleunigungssensoren sind in 4.3 und 4.4 abgebildet.

In beiden Abbildungen ist ein Anstieg -1 deutlich zu sehen. Im rechten Teil beider Abbildungen ist ein deutlicher Anstieg des Rauschens der Allan-Standardabweichung bei langen Clusterzeiten zu erkennen. Dieses Phänomen ist auf die geringe Anzahl an Samples und somit auf zufällige Abweichungen zurückzuführen.

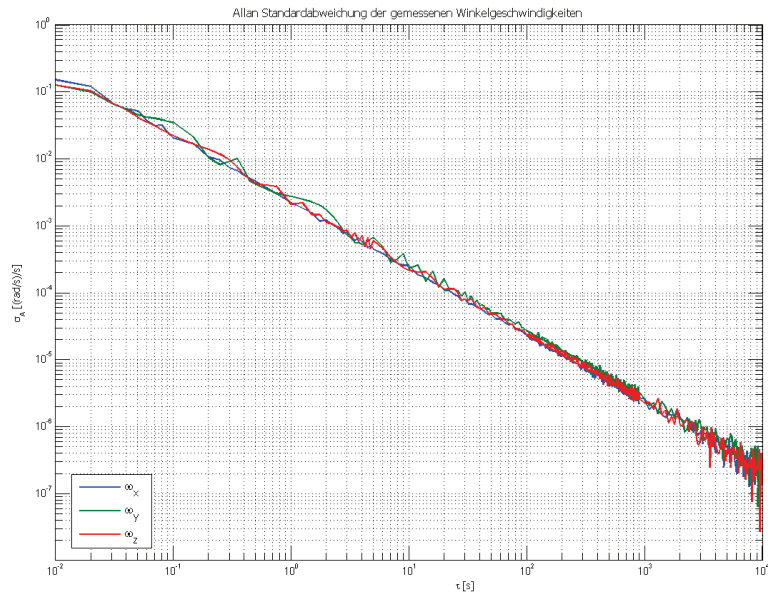


Abb. 4.3: Log-Log-Plot der Allan-Standardabweichung für die Kreiselkanäle der MP II IMU.

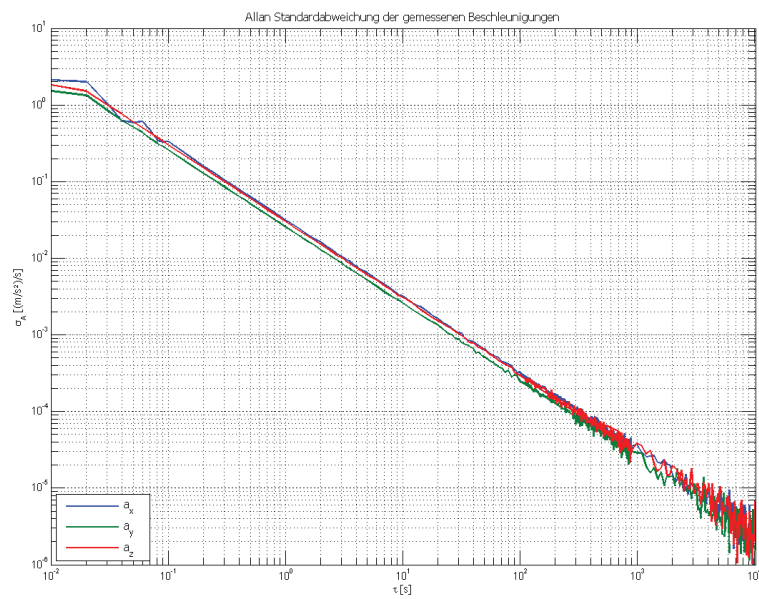


Abb. 4.4: Log-Log-Plot der Allan-Standardabweichung für die Beschleunigungskanäle der MP II IMU.

Tab. 4.1: Spektrale Rauschdichte der einzelnen IMU-Kanäle aus 100 Hz Rohdaten abgeleitet.

	X	Y	Z
Beschleunigungen			
weißes Rauschen [(m/s) ² /Hz]	1.78·10 ⁻⁸	2.49·10 ⁻⁸	2.03·10 ⁻⁸
Random Walk [(m/s) ² /s]	5.23·10 ⁻¹²	1.41·10 ⁻¹²	2.86·10 ⁻¹²
Drehraten			
weißes Rauschen [(rad/s) ² /Hz]	3.37·10 ⁻⁵	2.22·10 ⁻⁵	3.03·10 ⁻⁵
Random Walk [(rad/s) ² /s]	9.88·10 ⁻¹⁰	1.20·10 ⁻⁹	8.01·10 ⁻¹⁰

Der Anstieg von -1 weist auf weißes Rauschen hin. Zur Quantifizierung wird eine Ausgleichsgerade mit einer Steigung von -1 in die Punkte der Allan Standardabweichung gelegt. Der Wert an der Stelle $\tau = \sqrt{3}$ und multipliziert mit 1 s entspricht der Standardabweichung σ_x der abgetasteten Werte. Die spektrale Dichte des weißen Rauschens kann über $q = \sigma_x^2 \cdot \Delta t$, wobei $\Delta t = 0.01$ s beträgt, berechnet werden. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 4.1 angeführt (Zeile 3 und 6).

Im Kalman-Filter wird ein Random-Walk-Prozess für den Bias für alle drei Kanäle angesetzt, um die zeitliche Variation der Nullpunktfehler zu modellieren. Dieser Fehlerterm würde in der logarithmischen Darstellung der Allan-Standardabweichung gegenüber der Clusterzeit τ mit einer charakteristischen Steigung von -1/2 in Erscheinung treten. In den Ergebnissen der Analyse der Daten aus der 8-Stunden-Messung ist kein Random-Walk zu erkennen. Wie in Hou (2004) bereits erklärt, müsste zur Feststellung des Random-Walk eine Zeitreihe von über 100 Stunden vorliegen. Aus Zeitgründen wurde eine solche Langzeitmessung im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht durchgeführt.

Daher wird die Bias-Variation mit Hilfe der zeitlichen Veränderung des Mittelwerts der jeweiligen Zeitreihe abgeschätzt. Die Messdaten wurden dazu in Zeitfenster zu je einer Minute unterteilt und für jedes Zeitfenster der Mittelwert berechnet. Daraus wurde die maximale zeitliche Veränderung Δa_{max} abgelesen. Zur Abschätzung im Sinne einer Standardabweichung wurde Δa_{max} durch 3 dividiert. Die spektrale Dichte ergibt sich aus der zugehörigen Varianz und aus dem Zeitintervall T , über das die maximale Variation auftritt, siehe Formel 4.12. Die geschätzten Rauschdichten für den Random-Walk der Biases sind ebenfalls in Tabelle 4.1 angeführt.

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{\Delta a_{max}}{3} \\
 q_{r.w}^{gyro} &= \frac{\sigma_x}{T}
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Für die Bestimmung des Random-Walk der Biases der Drehratensensoren wird analog vorgegangen. Es wird nur $\Delta \omega_{max}$ statt Δa_{max} verwendet.

5 Messungen

5.1 Testmessung mit Messroboter

Als erstes Experiment wurde eine kinematische Messung am Dach der TU Wien durchgeführt. Diese Messung hatte zum Ziel, die Aufzeichnungsalgorithmen und die Auswertung der Daten zu überprüfen und erste praktische Erfahrungen mit dem Mess- und Auswertesystem zu sammeln. Dabei wurde in der Auswertung die Trajektorie der IMU geschätzt.

Als Geräteträger diente der institutseigene Messroboter Seekur Jr der Firma Mobile Robots, siehe Abbildung 5.1. Der mobile Roboter kann durch eine drahtlose Netzwerkverbindung gesteuert werden. Der Messablauf basierte auf einem Wechselspiel aus statischen Phasen und kinematischen Phasen mit jeweils einer Dauer von ca. 15 Minuten. Zum Zeitpunkt dieses Experimentes konnte der Roboter noch keine Trajektorie aufzeichnen, daher wurde dieser so gesteuert, dass er mit einer Genauigkeit von etwa 0.5 m (laterale Abweichung) dieselbe Strecke wiederholt abfuhr. Die Strecke wurde mittels Maßband ausgemessen, um die Ergebnisse des Filters auf Plausibilität überprüfen zu können. Die Messungen fanden am 13. und 14.7.2010 statt.

Die IMU MP II war mit Schrauben an der Abdeckung des Roboters fix montiert. Da zu diesem Zeitpunkt die in Abschnitt 3.1.1 vorgestellten GPS-Empfänger und Antennen nicht verfügbar waren, wurde als Ersatz ein Leica 500 GPS-Empfänger und eine Leica Antenne des Typs AT502 eingesetzt. Die Antenne war an der Deckplatte der IMU über die Herzschraube befestigt. Die Anordnung der Sensoren auf dem Messroboter ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Der Offset vom geschätzten Zentrum der IMU (=Ursprung des b-Systems) zum Antennenphasenzentrum wurde mit 21 cm in z-Richtung geschätzt. Die Synchronisation der IMU- und der GPS-Daten erfolgte wiederum über das PPS-Signal des Empfängers. Laptop, Akkus, A/D-Wandler und Zubehör wurden mit Hilfe eines doppelseitigen Klebebandes auf dem Messroboter befestigt.

Als Referenzstation diente die von der Forschungsgruppe „Höhere Geodäsie“ betriebene GPS Permanent-Station am Dach des Institutes, deren Antenne TPSCR.G3 in unmittelbarer Nähe (~20 m) zur Testtrajektorie montiert ist. Die Koordinaten und die Beobachtungsdateien wurden zur Verfügung gestellt. Die Aufzeichnungsrate für die GPS-Empfänger betrug 1 Hz und für die IMU 100 Hz. Die für die Aufzeichnung und Einlesung der IMU Daten geschriebenen Programme liefen problemlos. Ebenfalls konnten die Algorithmen zur Zeitsynchronisation und zur Konvertierung einwandfrei benutzt werden.

Alle nötigen Dateien wie präzise Ephemeriden, Ionosphärenmodell, Empfänger- und Antennenspezifikationen sowie das Steuerfile für den Kalman Filter wurden wie in Wieser (2007a) bereitgestellt. Zuerst wurde eine reine GPS-Lösung berechnet. Dafür mussten ein geeignetes Systemmodell erstellt und die stochastischen Eigenschaften abgeschätzt werden. Anschließend



Abb. 5.1: Kinematische Messung mit dem GPS-IMU System am Dach der TU Wien.



Abb. 5.2: Befestigung der Sensoren am Messroboter.

wurde die Messfahrt in einzelne interessante Sessions (verschiedene GPS-Empfänger und Antennenkombinationen wurden ebenfalls ausgetestet) unterteilt und die Session 8 (statische Phase am Anfang und Ende dazwischen kinematisch) wurde für die weitere Auswertung ausgewählt.

Für die GPS/INS-Kombination wurde experimentell untersucht, mit welchen Beobachtungskombinationen (doppelt-differenzierte Phasen- und Codelösung oder reine doppelt-differenzierte Trägerphasenlösung etc.) und mit welchen Parametern für die Rauschdichten Ambiguitäten fixiert und die IMU Biases bestmöglich geschätzt werden können. Als stabilste Lösung hat sich die doppelt-differenzierte Trägerphasenlösung mit zusätzlicher Einbeziehung des doppelt-differenzierten Codes erwiesen. Die geschätzte Trajektorie und die Höhenvariation sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

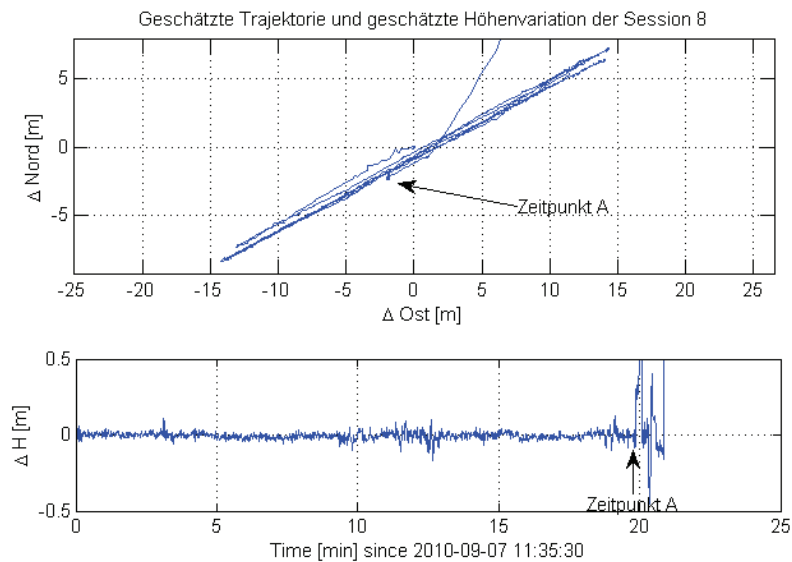


Abb. 5.3: Geschätzte Trajektorie aus der GPS-IMU Auswertung der Session 8 am 14.7.2010.

In den ersten neun Minuten dieser Session bewegte sich der Roboter nicht. Diese statische Phase ist in Abbildung 5.4 dargestellt, wobei die blaue Linie die geschätzten Koordinatenvariationen und die rote Linie die geschätzte Standardabweichung repräsentieren. Obwohl keine Bedingungen für die Lage eingeführt wurden, kann die Nord- und Ostkomponente mit einer Standardabweichung von 3 cm bestimmt werden. Die ellipsoidische Höhe konnte ebenfalls mit dieser Genauigkeit geschätzt werden. Die theoretische Standardabweichung (rote Linie) der Schätzung liegt deutlich außerhalb der Variationsbreite und ist somit größer als die empirische Standardabweichung der geschätzten Positionen. Der Grund ist, dass das Varianzmodell des GPS-Empfängers nur auf Schätzwerten beruht und diese zu pessimistisch angenommen wurden. In einer weiteren Arbeit sollte ein passenderes Varianzmodell für die Novatel-Empfänger aus geeigneten Testmessungen bestimmt werden.

Während der kinematischen Phase ist die linienhafte Fahrspur des Roboters deutlich zu sehen.

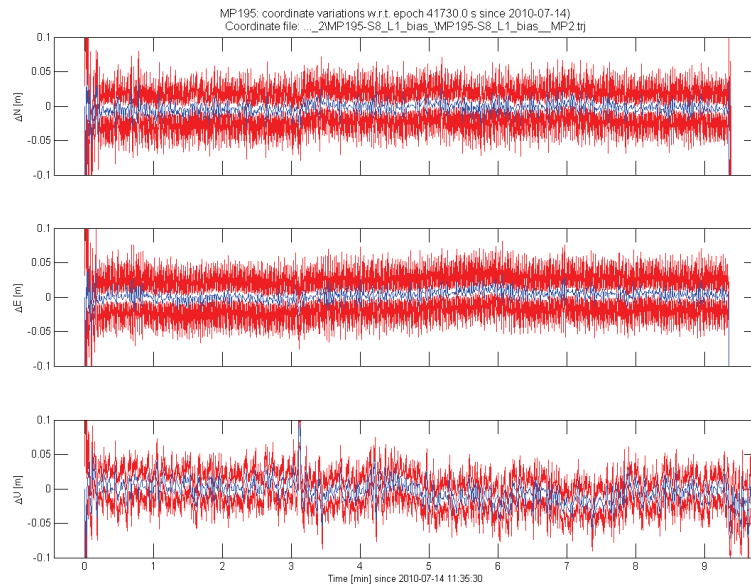


Abb. 5.4: Zoom in die statische Anfangsphase der Session 8 am 14.7.2010. (blau: geschätzte Koordinatenvariationen, rot: $\pm 1\sigma$)

Am Anfang der Bewegung erkennt man in Abbildung 5.3 noch kleine Ausreißer. Die Länge der geschätzten Trajektorie entspricht ca. der mit dem Maßband eingemessenen Profillänge.

Nach etwa 20 Minuten (Markierung: Zeitpunkt A in Abbildung 5.3) führt ein unbehandeltes Problem zu völlig falschen Lösungen der geschätzten Trajektorie. Die Position ist innerhalb weniger Minuten um Kilometer von der tatsächlichen Position entfernt. Nach einer kurzen statischen Phase bewegte sich der Roboter abrupt wieder. Ab diesem Zeitpunkt wurden nach und nach die GPS-Beobachtungen als Ausreißer detektiert und die Lösung stützt sich nur noch auf die IMU-Prädiktion. Dieses Problem trat später durch Einbeziehung der Magnetometer und fiktiver Beobachtungen nicht mehr auf und wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht weiter analysiert. Dennoch sollte die Ursache in einer späteren Arbeit untersucht und die Qualitätskontrolle in KF_run um eine Plausibilitätskontrolle zum Detektieren und Beheben der Filterdivergenz entsprechend verbessert werden.

Ein weiteres Manko war das Fehlen eines Magnetometers im Messsystem. Die Roll- und Nickwinkel können erst bei ausreichender Bewegung des Roboters geschätzt werden. Der Gierwinkel und der Bias des z-Kreisels sind während einer statischen Phase nicht beobachtbar. Innerhalb der kinematischen Phase mit signifikanten Beschleunigungen sind hingegen der Gierwinkel und der Bias des z-Kreisels bestimmbar, doch darf die Prädiktion vom tatsächlichen Wert nicht zu stark abweichen. Erst durch die Einführung von Näherungswerten für alle Biases konnte ein plausibles Ergebnis, wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, erzielt werden. Zur Bestimmung der Näherungswerte für die Biases wurde der Median der IMU-Kanäle (reduziert um die Erddrehung und Erdbeschleunigung) der ersten 9 Minuten (statische Phase) berechnet. Aufgrund dessen, dass der Roboter nur vorwärts und rückwärts bewegt wurde, sollte der

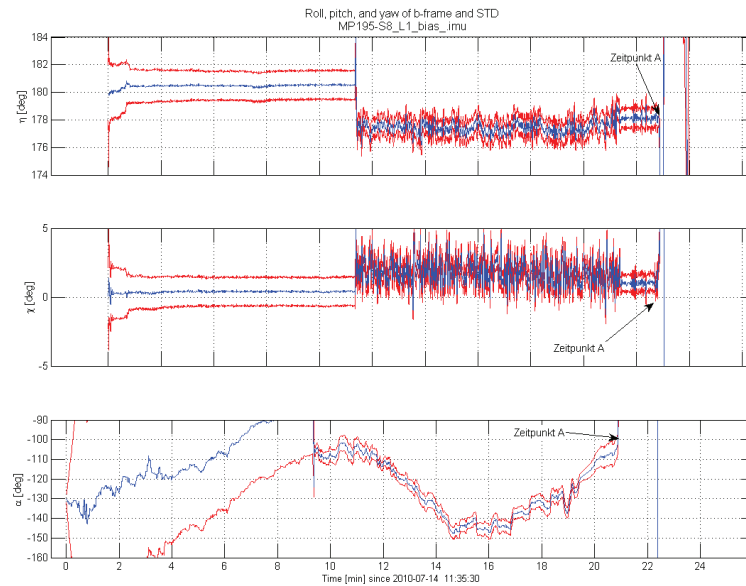


Abb. 5.5: Geschätzter Roll-, Nick und Gierwinkel (mit guten Näherungswerten für den Bias).

Gierwinkel über die gesamte Messdauer konstant sein.

Trotz der diskutierten Probleme, dass die GPS/IMU-Kombination während der kinematischen Phase gute Ergebnisse liefert. Daher erfolgte die weitere experimentelle Untersuchung im Rahmen realer hydrographischer Messungen, wobei ein Magnetometer in das Messsystem aufgenommen wurde.

5.2 Hydrographische Messung

Das hydrographische Experiment fand in Zusammenarbeit mit der Firma FLUSSBAU - MAYR UND SATTLER OEG am 7.9.2010 statt. Die Firma FLUSSBAU stellte die Ausrüstung zur hydrographischen Vermessung zur Verfügung. Die hydrographische Vermessung wurde von Seiten der FLUSSBAU auch durchgeführt. Somit konnte ich mich ganz auf das GPS/IMU System und die Datenaufzeichnung während des Experiments konzentrieren. Als Messgebiet dient das Laufkraftwerk Rosegg an der Drau in Kärnten. Das Messgebiet wurde aufgrund der geringen Abschattungen für die GPS-Messungen ausgewählt. Damit eröffnet sich bei der Analyse im Post-Processing die Möglichkeit zunächst eine Referenzlösung durch Verwenden aller Beobachtungen zu berechnen und dann durch Elimination von Beobachtungen ungünstige Szenarien durchzurechnen und zu bewerten.

5.2.1 Messaufbau

Das Messboot ist ein leichtes Aluminiumboot mit einem Außenbordmotor. Auf dem Boot ist ein item-Profil mit Zurrgurten fix befestigt. An der Bugseite des Bootes kann ein Mast mit dem Echolotschwinger fix im item-Profil eingehängt werden. Die Einhängung des Mastens ist so konzipiert, dass der Mast beim Messbetrieb möglichst lotrecht steht. Am oberen Mastende befindet sich ein Adapter zur Fixierung einer GPS-Antenne. Das herkömmliche Messsystem für die hydrographische Vermessung der Firma FLUSSBAU ist in Reiner und Mayr (2009) beschrieben. Für die Lotung wurde das Vertikalecholot DESO 14 der deutschen Firma ATLAS Elektronik GmbH verwendet. DESO 14 ist ein hochgenaues, tragbares, einkanaliges Vermessungs-Echolot, das mit den meisten kommerziellen Schwingern kompatibel ist: Für diese Zwecke wurde das Echolot mit einem 210 kHz Wandler (TC 2003) mit 3° Öffnungswinkel ausgestattet. Die Messrate des Echolots betrug 2 Hz.

Die Software HydroPro verarbeitet parallel die verschiedensten Eingänge, wie z.B. Koordinaten vom GPS-Empfänger oder von einer Totalstation und gemessene Entfernungen des Echolotschwingers. Die Echolotmessungen werden mit einem GPS-Zeitstempel versehen und in einer Datenbank abgespeichert. Die Konfiguration der Echolotaufnahmen geschieht ebenfalls über diese Software. Die FLUSSBAU zeichnete „ihre“ Daten auf einem eigenen Laptop auf. In der Software werden die aktuelle Position und die bisher gemessenen Tiefenwerte in einer Karte angezeigt.

Tab. 5.1: Position der Sensoren im b-System während des hydrographischen Experiments.

[cm]	X^b	Y^b	Z^b
Motion Pak II	0.0	0.0	0.0
Xsens MTi	-6.0	-3.5	12.5
Aero GPS-Antenne	0.0	0.0	23.0
Trimble GPS-Antenne	88.0	0.0	105.0
Echolotschwinger	88.0	0.0	-74.3
360° Prisma	-48.0	0.0	40.0

Die MP II IMU konnte über zwei Schrauben auf dem item-Profil befestigt werden. Die GPS-Antenne wurde auf der Deckplatte der IMU wie bei den Messungen am Dach der TU Wien befestigt. Die MTi IMU wurde achsparallel auf der Deckplatte der MP II IMU befestigt. Der Aufbau der Messsensoren auf dem Messboot und die Position zueinander ist in Abbildung 5.6 sowie in Abbildung 5.7 ersichtlich. Die Position aller Sensoren im b-System ist in der Tabelle 5.1 angegeben.

Der GPS-Empfänger und der A/D-Wandler wurden vor Spritzwasser mit Kunststoffsäcken geschützt. Die IMU wurde durch denselben 12-Akku mit Strom versorgt wie bei den vorhergehenden Laborversuchen. Es befindet sich eine Stromversorgung über mehrere Autobatterien an Bord, doch war nicht auszuschließen, dass diese die Rauschparameter der IMU beeinflussen könnten und daher wurde diese Stromversorgung nicht verwendet.

Die eigene GPS Referenzstation wurde auf der Staumauer aufgebaut und befand sich in unmittelbarer Nähe zum Messgebiet. Die Aero Antenne war auf einem Lotstock montiert. Dieser



Abb. 5.6: Messaufbau der Verortungssysteme auf dem Messboot.



Abb. 5.7: Detailfoto des Messaufbaus.



Abb. 5.8: Eigene Referenzstation auf der Staumauer des Laufkraftwerkes Rosegg.

wurde mittels Zurr Gurten an einem Stativ fixiert und horizontiert. Der Novatel-Empfänger und der Datenlogger wurden ebenfalls mittels eines 12 V Akkus mit Strom versorgt. Der Empfänger, der Datenlogger und der Akku wurden ebenfalls vor Regen geschützt. Der Aufbau der Referenzstation ist in Abbildung 5.8 ersichtlich. Der Standort der Referenzstation wurde so gewählt, dass die umliegenden Einbauten (Masten) wenig Einfluss auf die Satellitensichtbarkeit hatten. Die Referenzstation zeichnete von 7:52:44 bis 16:43:32 GPS-Zeit Daten auf. Nach der Messung wurde kontrolliert, ob der Lotstock und die GPS-Antenne noch horizontiert waren, was gegeben war.

5.2.2 Messablauf

Für Kontrollmessungen war noch ein Trimble R6 GPS-Empfänger an Bord. Die GPS-Antenne war am Mast befestigt. Zusätzlich war ein 360° Prisma auf dem Boot, das auch mittels Zurr Gurten auf dem Item-Profil fixiert wurde. Die Trajektorie des Bootes wurde innerhalb eines kurzen Zeitfensters mit einer Leica Totalstation beobachtet. Die Rohdaten des Trimble GPS-Empfängers wurden aufgrund eines Konfigurationsfehlers nicht abgespeichert und standen für die spätere Analyse daher nicht zur Verfügung. Die Kontrollmessungen der Totalstation wurden in diese Arbeit aufgrund der geringen Datenrate (Sichtverbindung Totalstation zu Prisma problematisch) nicht eingearbeitet. Beide Verfahren dienten aber zur Real-Time-Positionierung des Bootes für die Echolot-Software HydroPro.

Tab. 5.2: Übersicht über die einzelnen Messfahrten.

	GPS-Startzeit	GPS-Endzeit
Messfahrt 1 (grün)	12:26:00	14:36:00
Messfahrt 2 (schwarz)	14:37:00	15:17:00
Messfahrt 3 (rot)	15:22:00	15:58:00

In einer ersten Echolotmessung wurde ohne Datenaufzeichnung eine Überblicksfahrt im Staube-
 reich gemacht, um den Untergrund nach charakteristischen Kanten oder Brüchen abzusuchen.
 Da der Staubebereich schon sehr verlandet ist, wurden die Messfahrten so angelegt, dass ein
 kleinerer Bereich vor der Staumauer mehrmals aufgenommen wurde. Das ausgewählte Messge-
 biet wurde mit Hilfe von Quer- und Längsprofilen linienhaft abgetastet. Vor Beginn und am
 Ende jeder Messfahrt wurde versucht, das Messboot quasi statisch zu halten. Dazu wurde das
 Messboot in der Nähe der Einstiegsstelle für 10 Minuten abgestellt.

In Abbildung 5.9 sind die Messfahrten über das Foto des Messgebiets gelegt. Während der
 ersten Messfahrt (grün) waren 3 Personen an Bord des Bootes. Bei der Zweiten waren nur
 noch 2 Personen an Bord. Diese musste aufgrund einer Unterbrechung der Stromversorgung
 an Bord des Schiffes in zwei Abschnitte (Messfahrt 2(schwarz) und Messfahrt 3(rot)) aufgeteilt
 werden. Die einzelnen Startzeiten sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Im Rahmen dieser
 Diplomarbeit wurde für die weitere Analyse nur die erste Messfahrt ausgewählt, weil sie
 aufgrund der Datenlänge und der abgetasteten Fläche die umfangreichsten Möglichkeiten
 bietet. Die Analyse wird im nächsten Kapitel beschrieben.

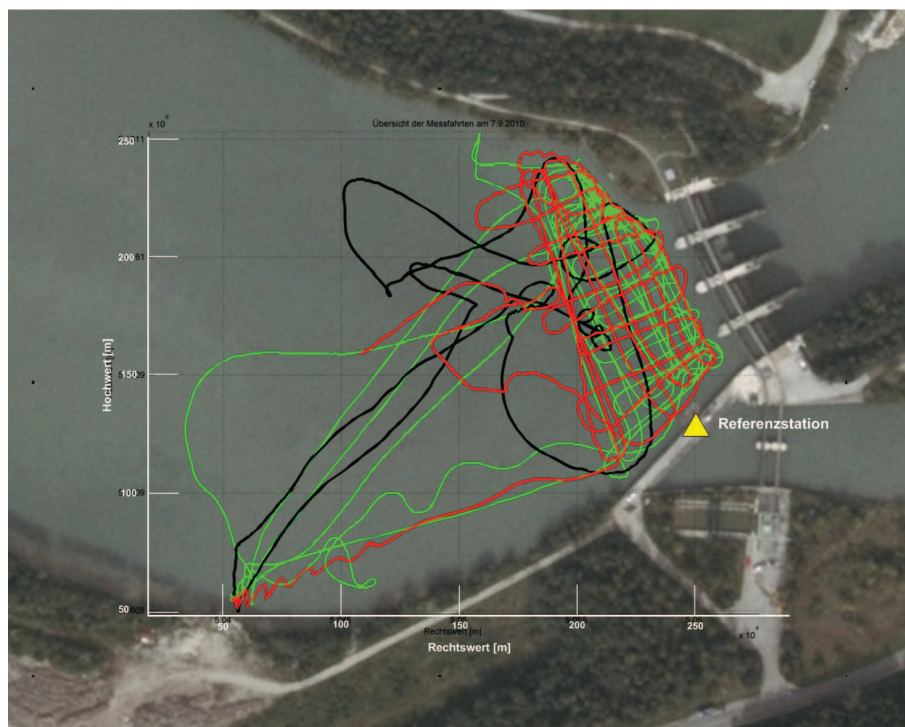


Abb. 5.9: Überblick über die Messfahrten und die Position der Referenzstation.

6 Auswertung

6.1 GPS-Auswertung

Es wird als erstes eine reine GPS-Auswertung berechnet, um eine Referenzlösung für die GPS/IMU-Kombination zu schaffen. Durch einen Vergleich der beiden Auswertetypen kann beurteilt und ausgearbeitet werden, welche Vorteile die IMU Einbindung für diese Anwendung hat.

6.1.1 Referenzstation

Da die Koordinaten der Referenzstation nicht bekannt sind, wurde als erstes eine SPP-Lösung der Referenzstation über die gesamte Beobachtungsdauer in der Software KF_run berechnet. Bei der SPP-Lösung wird die Position mittels undifferenzierten Codes berechnet und weist nur eine geringe Genauigkeit (Meterbereich) auf. Für die Stationskoordinaten wurde der Median über das Zeitfenster der eigentlichen hydrographischen Vermessung (ca. 12:00 - 16:30) berechnet. Die geschätzten Koordinaten der Referenzstation sind in Tabelle 6.1 angeführt und für die weiteren Auswertungen fest gehalten.

Tab. 6.1: Koordinaten der Referenzstation im ITRF 2005.

X [m]	Y [m]	Z [m]
4261349.57	1061925.85	4610575.27

6.1.2 Auswertung der Messfahrten

Bei der GPS-Auswertung der Messfahrten wurde iterativ vorgegangen, um geeignete Näherungskordinaten für die Trägerphasenlösung abzuleiten. Als erstes wurde eine SPP-Lösung aus den Pseudostrecken berechnet. Danach wurde die geschätzte Position zu Beginn der Messung als Startwert für eine doppelt-differenzierte Codelösung mit zusätzlicher Einbindung der GPS-Doppler-Beobachtungen verwendet. Hierfür musste ein geeignetes dynamisches Modell für den Prädiktionsschritt definiert werden. Es wurde eine nahezu gleichförmige Bewegung angesetzt, indem die Position und die Geschwindigkeit als Random Walk mit relativ kleiner Rauschdichte angesetzt wurden. Die spektrale Rauschdichte $q_{\dot{x}}$ für den Random-Walk der Geschwindigkeit wurde mit $1 \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$ angesetzt. Es wurde in diesem Fall kein Random Walk für die Position angesetzt. Die Resultate dieser Schätzung wurden als Startwerte für eine doppelt-differenzierte Trägerphasenlösung verwendet.

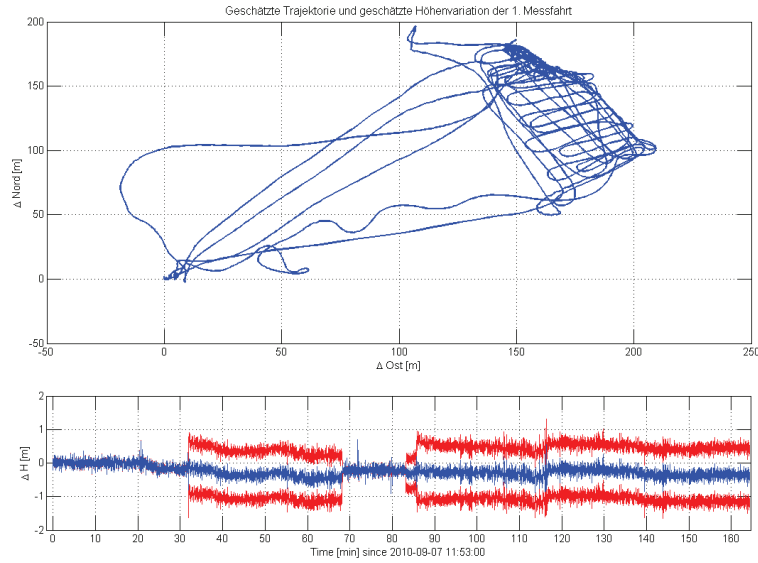


Abb. 6.1: Geschätzte Trajektorie und Höhenvariation der 1. Messfahrt aus der trägerphasenbasierten Lösung. (blau: geschätzte Koordinatenvariationen, rot: $\pm 1\sigma$)

Schlussendlich wurde die finale doppelt-differenzierte Phasenlösung unter Einbeziehung der GPS-Doppler-Beobachtungen berechnet. Das plausibelste Ergebnis (glatter Verlauf während der Wendemanöver) konnte mit einer Rauschdichte für den Random-Walk der Geschwindigkeit von $q_{\dot{x}} = 1.5 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ erzielt werden. Die Geschwindigkeit kann sich somit von einer Sekunde auf die andere um etwa $\sqrt{q_{\dot{x}}} \cdot 3$ (3.67 m/s) ändern. Die geschätzte Trajektorie des Messbootes ist in Abbildung 6.1 mit dieser Einstellung zu sehen. Die Höhenkomponente ist auffallend stark verrauscht. Die rote Linie symbolisiert die theoretische Standardabweichung der geschätzten Höhe, wenn diese Linie verschwindet konnten die Ambiguitäten fixiert werden. Lagemäßig kann die Trajektorie einwandfrei bestimmt werden.

Es wurde ebenfalls ein Modell mit gleichförmiger Beschleunigung ausgetestet, in der Vermutung, dass damit die Bewegung des Bootes besser modelliert werden kann. Es konnten aber keine passenden Parameter für die Rauschdichten gefunden werden, um die Bewegung des Bootes optimal zu schätzen.

Auf die Stützung der Lösung durch fiktive Koordinaten- und Geschwindigkeitsbeobachtungen wurde in dieser Phase verzichtet. Ebenfalls wurden noch keine Informationen der IMU verwendet.

Für die Schätzung der Rauschdichten benötigt man Fingerspitzengefühl, denn die Fahrgeschwindigkeit und Fahrstil fließen hierbei ein. Beispielweise wurden die besten Ergebnisse für die beiden anderen Messfahrten mit einer Rauschdichte von $q_{\dot{x}} = 1 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ für die 2. Messfahrt und $q_{\dot{x}} = 2 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ für die 3. Messfahrt erzielt. In einer Echtzeit-Anwendung gibt es aber nicht die Möglichkeit, die Parameter aus den zugrunde liegenden Messdaten zu bestimmen. Daher muss für eine reine GPS-Auswertung das dynamische Modell in KF_run

für die Bootsbewegung optimiert werden, indem einerseits ein adaptiver Kalman Filter mit variabler Rauschdichte für den Random-Walk verwendet wird oder andererseits die IMU-Daten verwendet werden, um die Geschwindigkeit und die Position mit den beobachteten Beschleunigungen zu präzisieren.

6.2 GPS-IMU Auswertung

Da die reine GPS-Auswertung in KF_run sehr sensibel gegenüber der Rauschdichte q ist, verwenden wir die IMU-Daten um die Position und die Orientierung des b-Systems von Epoche zu Epoche zu schätzen. Das dynamische Modell der GPS-Auswertung wird durch die Navigationsgleichungen (Abschnitt: 3.3.2) und die IMU-Daten ersetzt. Die Unsicherheit wird nicht mehr durch den Random Walk der Position und der Geschwindigkeit oder ähnliches sondern durch die Rauschdichten vom weißen Rauschen und vom Random Walk der Biases aller IMU Kanäle quantifiziert.

In einem ersten Schritt wurden für die GPS-IMU Kombination die ermittelnden Rauschparameter aus Abschnitt 4.4 (also einer Testmessung mit der vorliegenden IMU im Messkeller) verwendet. Die Lösung des Kalman Filters ist daraus aber bereits nach wenigen Minuten kilometerweit von der tatsächlichen Position entfernt. Die geschätzten Elemente des Zustandsvektors driften davon und die GPS-Beobachtungen werden fälschlicherweise als Ausreißer detektiert, weil die geschätzten Varianzen aus den spektralen Rauschdichten zu klein gewählt wurden. Daraufhin wurden die IMU-Daten einer statischen Phase des hydrographischen Experiments einer FFT-Analyse unterzogen.

In Abbildung 6.2 ist das Amplitudenspektrum der Beschleunigungskanäle zu sehen. Darin sind deutlich eine Störfrequenz von ca. 11.8 Hz und deren Harmonische in allen drei Kanälen zu erkennen. In den Laborversuchen aus Abschnitt 4.4 wurden dagegen keine Störfrequenzen detektiert. Vermutlich wird dieses Rauschen durch den Außenbordmotor des Bootes hervorgerufen. 11.8 Hz entsprechen beispielsweise ca. 700 Umdrehungen pro Minuten des Motors. In den Bewegungsphasen wird der Motor mit wahrscheinlich noch höheren Drehzahlen drehen. Die maximale Tourenanzahl beträgt 3.000-4.000 Umdrehungen pro Minute.

Dadurch war das Boot einer ständigen, spürbaren Vibration ausgesetzt. Besonders die Montage der IMU in der Mitte von frei hängenden item-Profilen ist sicher nicht vorteilhaft und haben wahrscheinlich die Vibrationen noch verstärkt. Bei sehr schnellen Fahrten konnte man sehen, dass auch die GPS-Antenne im Millimeterbereich vibrierte. Die Bandbreite der IMU und die Aufzeichnungsrate waren auf diese Vibrationen nicht abgestimmt. Daher sind die im Laborversuch ermittelten Rauschparameter der IMU für die reale Messung am Boot nicht verwendbar. Es wurden deshalb geeignete Rauschparameter experimentell aus den Messdaten von der hydrographischen Vermessung ermittelt, siehe Tabelle 6.2.

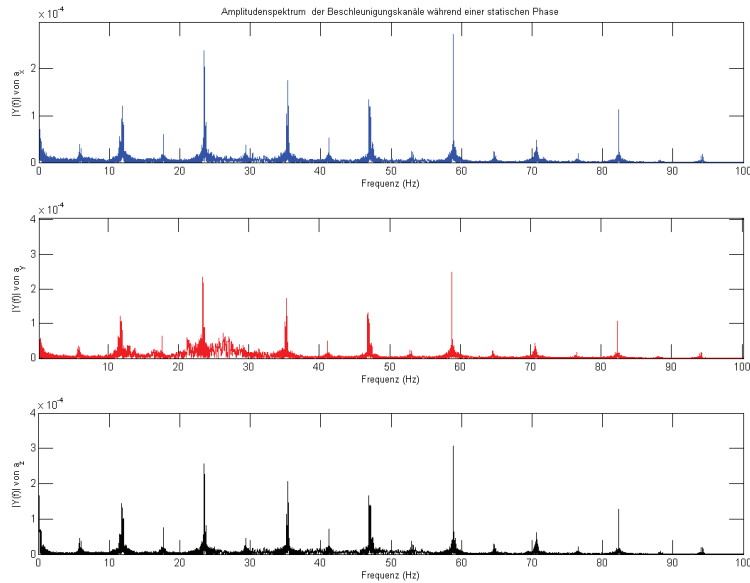


Abb. 6.2: Amplitudenspektrum der IMU-Daten während einer statischen Phase im hydrographischen Experiment.

Tab. 6.2: Verwendete Rauschparameter für die IMU während der Messfahrt.

	X	Y	Z
Beschleunigungen			
weißes Rauschen $[(\text{m/s})^2/\text{Hz}]$	0.004	0.004	0.004
Random Walk $[(\text{m/s})^2/\text{s}]$	$0.5 \cdot 10^{-7}$	$0.5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Drehraten			
weißes Rauschen $[(\text{rad/s})^2/\text{Hz}]$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Random Walk $[(\text{rad/s})^2/\text{s}]$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$

Die geschätzte Trajektorie der IMU (Ausschnitt des hydrographischen Messgebiets) ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Auffallend ist hierbei, dass nach Wendemanövern die geschätzte Trajektorie teilweise kurzzeitig unrealistische Verläufe annimmt. Die Resultate deuten daraufhin, dass die Biases der IMU noch nicht optimal geschätzt wurden. Die Höhe ist gegenüber der reinen GPS-Lösung nicht mehr so stark verrauscht, aber die Höhe zeigt aber eine kontinuierliche Abnahme der Höhe an, was nicht wahrheitsgetreu ist. Ähnlich wie bereits beim Experiment am Dach der TU Wien mit dem Messroboter gibt es einen Moment, ab dem die geschätzte Trajektorie völlig von der wahren wegdriftet (Zeitpunkt A). Die Lage und Höhe ist ab dem Zeitpunkt A um Kilometer von der tatsächlichen Position entfernt.

Der Zeitpunkt A liegt in beiden Fällen am Übergang von dynamischer in statische Phase.

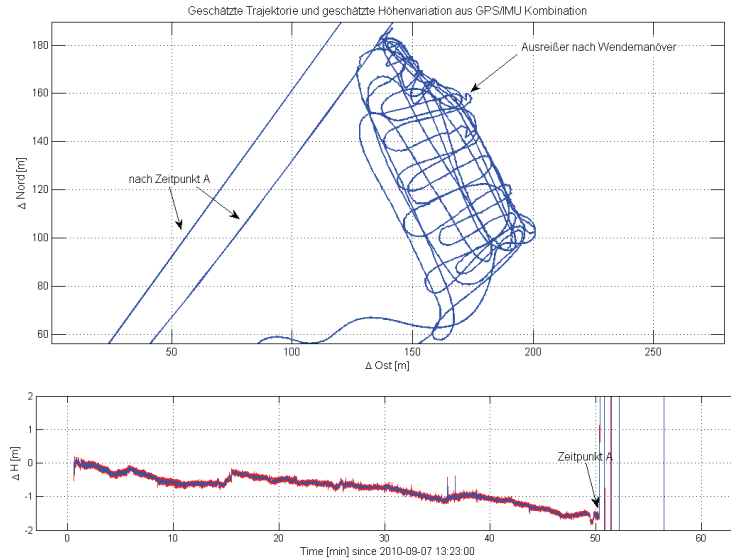


Abb. 6.3: Geschätzte Trajektorie der Messfahrt 1 aus der GPS-IMU Kombination.

Während der statischen Phase ist der z-Bias praktisch unbestimmt, weil es keine Bedingung für die Neigungen und Rotationen, wie z. B. $\omega_z = 0$, in der Software gibt. Beim Vorexperiment in Abschnitt 5.1 wurden deshalb gute Näherungswerte für die Biases direkt aus den Rohdaten ermittelt, um die Prädiktionsfehler der IMU zu reduzieren. Da die Biases nach Ein- und Ausschalten verschieden sind und das Boot nie ganz in Ruhe war, konnte dieses Verfahren hier nicht verwendet werden. Daher werden die Magnetometerdaten benutzt, um den Bias des z-Kanals besser schätzen zu können und um die gesamte Auswertung zu stützen.

Die Azimutbeobachtungen wurden mit einer Frequenz von 1 Hz und einer Standardabweichung von 3° in die Kalman Filter Software eingeführt. Zusätzlich wurde angenommen, dass sich das Boot auf einer genäherten Horizontfläche bewegt. Die ellipsoidische Höhe wurde aus dem Median der reinen GPS-Lösung (Abschnitt 6.1.2) bestimmt und mit einer Standardabweichung von 14 cm für die gesamte Beobachtungsdauer als fiktive Beobachtung eingeführt. Dieser Maßnahmenmix führt zu einem deutlich besseren Ergebnis (teilweise Fixierung der Ambiguitäten, kleine Schwankungsbreite der geschätzten Biases) in der Bestimmung der Trajektorie. Die gesamte Trajektorie, die mit diesen Maßnahmen erhalten wurde, ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Die geschätzte Trajektorie weist einen überaus glatten Verlauf auf. Es kommt zu keinen signifikanten Ausreißern. Gegenüber der reinen GPS-Lösung konnte auch das Rauschen in der Höhenvariation deutlich verringert werden, siehe Abbildung 6.4

In der Abbildung 6.5 ist ein Ausschnitt der Trajektorie zu erkennen. Deutlich zu sehen ist, dass während beziehungsweise kurz nach den Wendemanövern noch Fehler in der Positionsschätzung bemerkbar sind. Die Fehler sind aber abhängig vom gefahrenen Kurvenradius und von der Fahrgeschwindigkeit. Die geschätzte Höhenvariation zeigt jeweils unrealistische Sprünge (gekennzeichnet durch die Buchstaben A-E). Teilweise zeigen sich auch deutliche Abweichungen

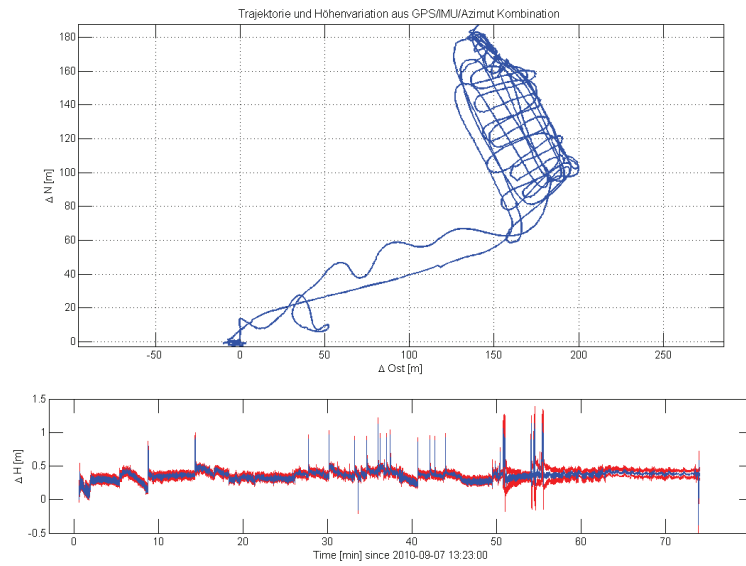


Abb. 6.4: Geschätzte Trajektorie der Messfahrt 1 aus GPS-IMU Kombination unter Einbeziehung der Magnetometerdaten und fiktiver Beobachtungen zur Beschränkung der geschätzten Höhe.

der Lage während des Wendemanövers.

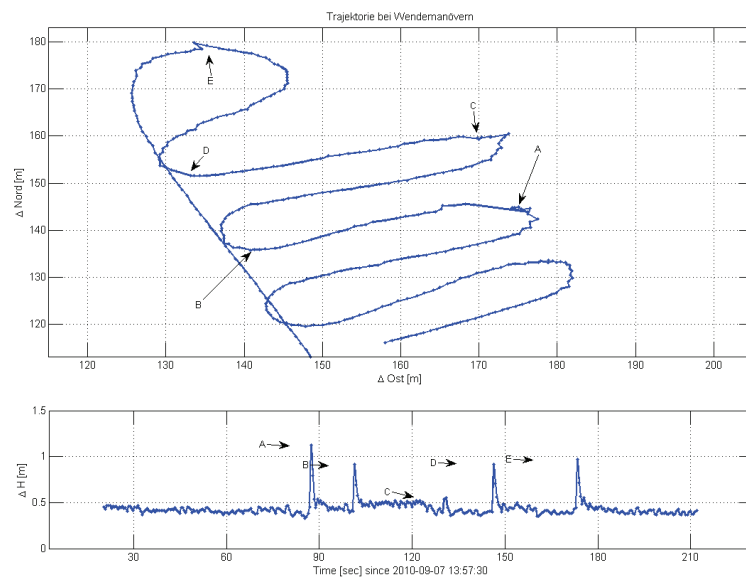


Abb. 6.5: Ausschnitt aus der Messfahrt.

Die Wendemanöver können mit Hilfe der zusätzlichen Azimutbeobachtungen besser als wie bei der GPS/IMU Kombination wiedergegeben werden, aber es kommt noch immer zu Abweichungen in Lage und Höhe. In der reinen GPS-Auswertung sind keine Ausreißer in den Kurven bemerkbar. Die Fehlerursache liegt höchst wahrscheinlich daran, dass die Drehratensensoren ω_x und ω_y zu stark verrauscht sind. Eine unzureichenden Berücksichtigung der zusätzlichen Beschleunigungen gepaart mit Unsicherheiten der geschätzten Neigungen des Bootes wirken sich vor allem im a_z -Kanal der IMU aus und beeinflussen somit die Prädiktion der Höhe. Die Vibrationen hervorgerufen durch den Motor beeinflussen das Rauschen und den Bias aller Kanäle, da während eines Wendemanövers der Motor meist gedrosselt wird, könnte es zusätzlich zu einer Verschiebung der Biases kommen. Eventuell könnten die Abweichungen auch aus einem Synchronisationsproblem stammen. Diese Phänomene sollten in einer weiteren Arbeit näher untersucht werden.

Weiters ist in dieser Abbildung auch zu sehen, dass die Höhe nach einer Wendung oftmals eine andere mittlere Höhe aufweist als vor der Wendefahrt (siehe Abbildung 6.5 unten). Dies kann auf die Fahrgeschwindigkeit und Fahrriichtung des Messbootes zurückgeführt werden. Wenn das Boot gegen die Strömung fährt, wird es auf der Bugseite stärker gehoben als bei einer Fahrt mit der Strömung. Zur Verifizierung dieser Hypothese wurde die Relativgeschwindigkeit des Bootes gegenüber dem Fluss berechnet. Dafür wurde die Fließrichtung (Azimut: ca. 60° aus Foto geschätzt) und die Fließgeschwindigkeit (ca. 0.5 m/s Schätzung) angenommen und zu einem für das gesamte Testgebiet konstanten Vektor \mathbf{v}_{Fluss} kombiniert. Die Relativgeschwindigkeit des Bootes kann aus folgender Formel abgeschätzt werden:

$$\mathbf{v}_{rel} = \mathbf{v}_{Boot}^T \cdot \frac{\mathbf{v}_{Fluss}}{\|\mathbf{v}_{Fluss}\|} - \|\mathbf{v}_{Fluss}\| \quad (6.1)$$

Vergleicht man die Relativgeschwindigkeit v_{rel} mit dem Betrag $\|\mathbf{v}_{Boot}\|$ der Horizontalgeschwindigkeit zeigt sich ein überaus glatter Verlauf der relativen Geschwindigkeit (siehe Abbildung 6.6). Setzt man nun die Relativgeschwindigkeit des Bootes in Zusammenhang mit der Höhenvariation, so kann gezeigt werden, dass das Boot beziehungsweise das Messsystem tatsächlich steigt, wenn das Boot gegen die Strömung (negative relativ Geschwindigkeit) fährt. Die Abbildung 6.7 zeigt im oberen Plot nochmals die Höhenvariation der Wendefahrten der Abbildung 6.5. Im unteren Plot ist die relative Geschwindigkeit des Bootes gegenüber dem Fluss aufgetragen. In dieser Abbildung kann die Höhenvariation auf die Fahrgeschwindigkeit und Fahrriichtung des Bootes zurückgeführt werden. Bei einer Fahrt gegen die Strömung (negative Geschwindigkeit) wird das System leicht gehoben beziehungsweise einer Fahrt mit der Strömung ist die Höhe dagegen geringer. Die ersten 60 Sekunden dieser Zeitreihe fanden im seitlichen Uferbereich statt, daher ist anzunehmen, dass das angenommene Geschwindigkeitsmodell ($\mathbf{v}_{Fluss} = \text{const.}$) in diesem Bereich nicht zutrifft.

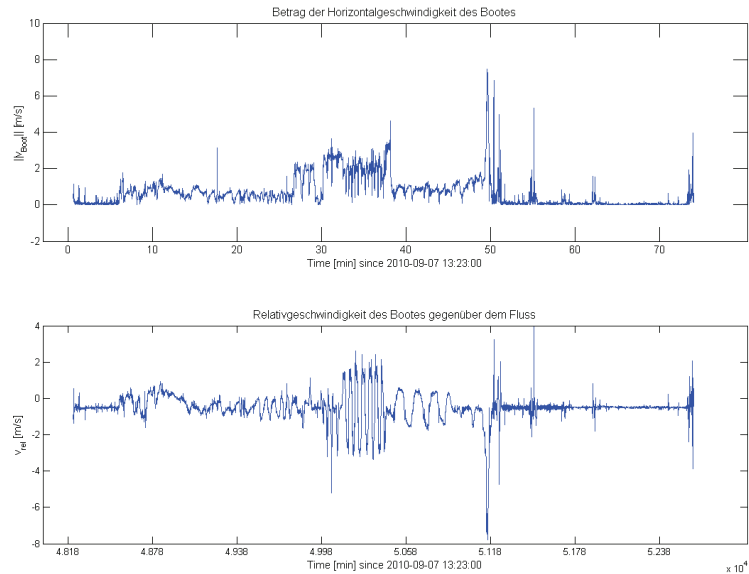


Abb. 6.6: Verlauf der horizontalen Geschwindigkeit gegenüber der relativen Geschwindigkeit.

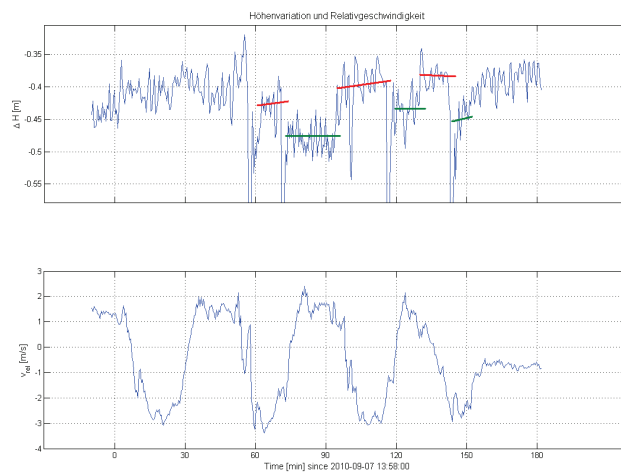


Abb. 6.7: Zusammenhang zwischen Höhenvariation und Relativgeschwindigkeit.

Diese Analyse zeigt, dass die je nach Fahrtrichtung des Bootes unterschiedlichen GPS Höhen plausibel sind. Eine Beurteilung der tatsächlich erreichten Genauigkeiten müsste im Rahmen weiterer Untersuchungen z. B. durch Vergleich mit Totalstationsbeobachtungen erfolgen.

In Abbildung 6.8 sind beispielsweise die geschätzten Roll- und Nickwinkel der gesamten

Messfahrt abgebildet (blau: Schätzwert und rot: Standardabweichung). Bis zur ca. Sekunde 48500 war das Boot nicht in Bewegung und die Biases der IMU konnten deshalb teilweise nicht geschätzt werden, was die anfänglichen großen und unrealistischen Neigungen erklärt. In der kinematischen Phase konnten die Biases und somit die Neigungen des Bootes gut bestimmt werden. Es zeigt sich, dass während der Messfahrt das System weitgehend horizontal liegt. Bei großer Geschwindigkeit war die Längsachse des Bootes durchschnittlich 2-3° geneigt. Nach Sekunde 51200 ist das Boot wieder annähernd in Ruhe und die Biases sind wiederum nicht ausreichend beobachtbar. Dies erklärt die größeren Orientierungsfehler.

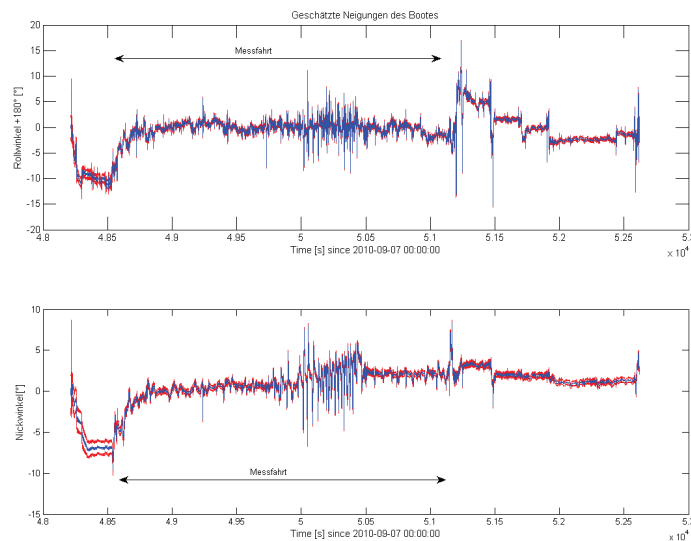


Abb. 6.8: Geschätzte Neigungen des Bootes während der gesamten Beobachtungsdauer.

6.3 Darstellung der Echolotdaten

Die Ergebnisse (Position und Orientierung) aus der kombinierten GPS, IMU und Magnetometer Lösung wurde für die Verortung der Echolotdaten verwendet. Die Verortung der gemessenen Tiefenwerte wurde wie im Abschnitt 3.4 beschrieben vorgenommen. Somit ist die Position des Echolot-Footprints an der Gewässersohle im Landeskoordinatensystem bekannt. Zur Darstellung wurde angenommen, dass der Wasserspiegel über das gesamte Messgebiet eine ellipsoidische Höhe von 532 m hat. Weiters wurde für Rechts- und Hochwert ebenfalls jeweils ein Referenzwert abgezogen. Die Gewässertiefe wurde relativ zur Referenzhöhe berechnet. Anschließend wurde ein Oberflächenmodell der Gewässersohle durch

- a) Triangulation nach Delaunay (Abbildung 6.9)
 - b) eine bilineare Flächeninterpolation aus der Triangulation mit einem Raster von 2 x 2 m (Abbildung 6.10)
- berechnet.

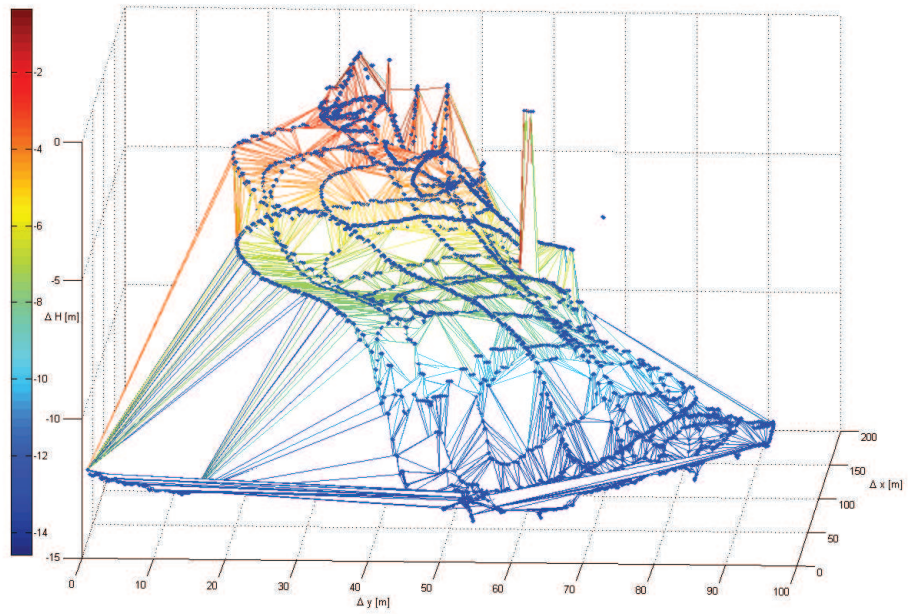


Abb. 6.9: Triangulation der verorteten Echolotaufnahmen der Gewässersohle.

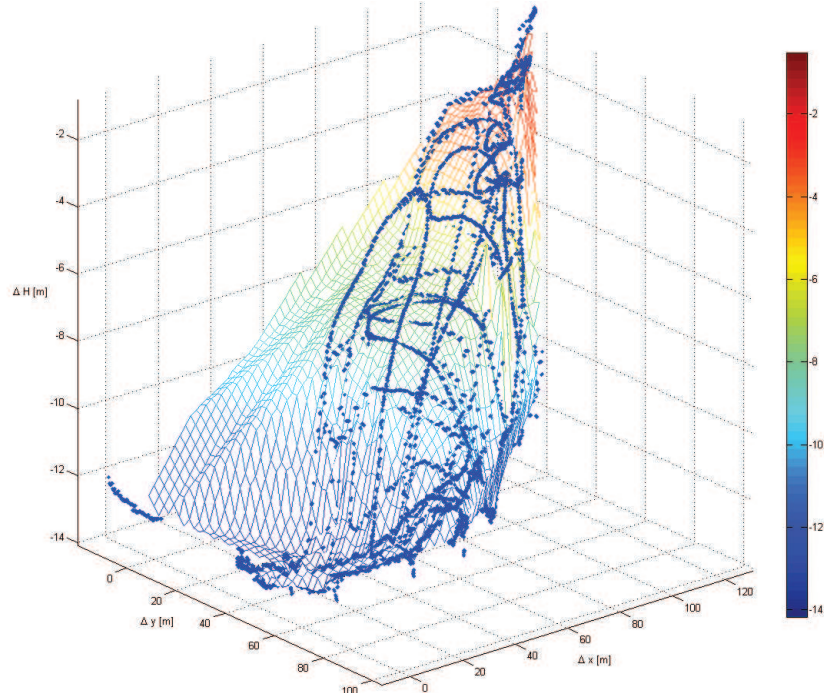


Abb. 6.10: Digitales Geländemodell der Gewässersohle.

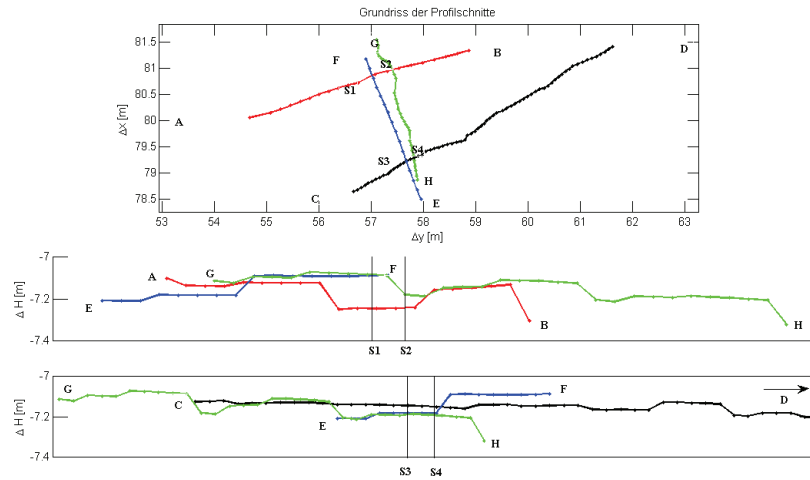


Abb. 6.11: Profilschnitte der Gewässersohle.

Beide Abbildungen sind überhöht dargestellt, um den Höhenverlauf der Gewässersohle besser zu veranschaulichen. In beiden Abbildungen symbolisieren die blauen Punkte die tatsächliche Lage und Höhe des verorteten Footprints also einen gemessenen Punkt der Gewässersohle. Die größten Tiefen wurden unmittelbar vor der Staumauer (rechte Begrenzung der beiden Modelle) gemessen. Die Gewässersohle zeigt sonst einen glatten Verlauf. Im seichten Gewässer (roter Bereich) befand sich ein Ast im Wasser. Auf diesen sind die scheinbaren Ausreißer in seichtem Bereich zurückzuführen. Ein weiterer Ausreißer (ca. in der Mitte des Aufnahmegebietes) ist Treibholz, das sich für kurze Zeit im Echolotschwinger verfangen hatte, zurückzuführen.

Zur genaueren Analyse wurden einige Profile aus dem Messgebiet ausgewählt und die gemessenen Tiefen an den Kreuzungspunkten verglichen. In der Abbildung 6.11 ist im oberen Bereich der Grundriss der Profile dargestellt. Im unteren Teil sind die extrahierten Profilschnitte mit den abgeleiteten ellipsoidischen Höhen der Gewässersohle zu sehen. Das Profil wurde willkürlich ausgewählt und befindet sich in der Mitte des Messgebiets, die ungefähre Wassertiefe beträgt 6 m. Die größte Differenz wurde bei Kreuzungspunkt (S1 zwischen roten und blauen Profil) mit ca. 15 cm festgestellt. Die weiteren Differenzen an den Kreuzungspunkten liegen im Bereich einiger cm. Die Fehlerquelle kann einerseits aus der Positionierung und Orientierung des Messsystem kommen oder andererseits aus der Echolotaufnahme. Die genaue Fehlerursache oder deren jeweiligen Anteile konnten in Rahmen dieser Diplomarbeit nicht ermittelt werden. Die Resultate geben Indikation, dass die geforderte Genauigkeit erreicht wurde.

7 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war, ein kostengünstiges Messsystem basierend auf einem Einfrequenz-GPS-Empfänger und einer MEMS IMU zur Verortung von kleinräumigen hydrographischen Aufnahmen zu untersuchen. Das Messsystem sollte bei einer Wassertiefe von maximal 15 m eine Verortungsgenauigkeit von 10 cm (1σ) erreichen. Aus einem hydrographischen Experiment sollten die erreichbaren Genauigkeiten des Messsystems abgeschätzt werden und Verbesserungsvorschläge sowie Vorschläge zur praktischen Arbeit sowie Datenanalyse ausgearbeitet werden.

Insgesamt kann man sagen, dass das Messsystem für die hydrographische Vermessung von kleinräumigen Gewässern prinzipiell geeignet ist. Das Messsystem aus trägerphasenbasiertem GPS und MEMS IMU musste um ein Magnetometer zur Stützung der Kreiselkanäle ergänzt werden, weil die Drehratensensoren zu stark verrauscht sind. Gegenüber der reinen GPS-Auswertung kann die Orientierung des Messbootes bestimmt und somit auch Sonaraufnahmen verortet werden. In der derzeitigen Version von KF_run kann bei einer reinen GPS-Auswertung die Bewegung des Bootes durch das dynamische Modell (konstante Rauschdichten für Random Walk der Geschwindigkeit und Random Walk der Position) mit viel Aufwand im Post-Processing wiedergegeben werden. Aufgrund des Aufwandes und Nichtübertragbarkeit der Parameter ist ein kommerzieller Einsatz so nicht denkbar. Die IMU Daten und die Navigationslösung ersetzen das dynamische Modell und die Position und die Geschwindigkeit kann in jeder Epoche präzisiert werden. Durch die Kombination aus GPS/IMU/Magnetometer wurde die geschätzte Trajektorie geglättet und die dafür notwendigen Rauschparameter sind auf alle Messfahrten übertragbar.

Geradlinige Fahrten konnten vom entwickelten Messsystem sehr gut aufgezeichnet werden. Die verorteten Echolotdaten zeigen, dass die Differenz an den Kreuzungspunkten im Bereich der Verortungsgenauigkeit von 10 cm (1σ) liegen.

Schwächen zeigten sich beim Wenden des Bootes. Teilweise wurden während der Wendemänover abrupte Höhenänderungen von bis zu 30 cm geschätzt, was sicherlich nicht der Realität entspricht. Die Ursache liegt höchst wahrscheinlich darin, dass der ω_x - und der ω_y -Kanal der IMU stark verrauscht sind und die Neigungen des Bootes nur ungenügend bestimmt werden. Unsicherheiten in den Neigungen äußern sich als Restkräfte der Fliehkraft im a_z -Kanal und wirken sich als scheinbare Höhenänderung im Prädiktionsschritt aus. Auch die Lagekomponente konnte besonders bei engen Kurvenradien oder hohen Geschwindigkeiten ungenügend bestimmt werden.

Für die Validierung des Messsystems müsste ein zusätzliches Kontrollsystem auf dem Boot aufgebaut werden, das sowohl die Position als auch die räumliche Orientierung des Bootes aufzeichnet. In Ermangelungen eines solchen Systems kann hier nur festgehalten werden, dass

die Resultate darauf hindeuten, dass das Messsystem bestehend aus GPS, MEMS IMU und Magnetometer die geforderte Genauigkeit, außer während eines Wendemanövers, liefert.

Vorschläge zur praktischen Arbeit sowie Datenanalyse sind in dieser Phase der Untersuchungen noch zu früh. Davor sollten die unten angeführten Verbesserungsvorschläge in einer weiteren Arbeit untersucht werden.

Insgesamt zeigt die Diplomarbeit, dass ein Messsystem aus trägerphasenbasiertem GPS, MEMS IMU und Magnetometer eine kostengünstige Alternative zu den bestehenden Verortungssystemen darstellt. Die Diplomarbeit zeigt, dass folgende Verbesserungsvorschläge und offene Frage in einer weiteren Arbeit untersucht werden sollten, wobei diese Arbeit die wesentlichen Grundlagen für diese weiteren Schritte bereitstellt:

- Bias-Schätzung während statischer Phasen durch Bedingungen für die Rotationen (ω_x und ω_y sind $0 \pm \sigma_w$) oder durch Bedingungen für die Neigungen
- Montage der IMU auf dem Messboot (Montage auf dem item-Profil hat wahrscheinlich die Vibration durch den Motor noch verstärkt)
- Qualitätskontrolle (Plausibilitätskontrolle mit Hilfe der Ergebnisse einer reinen GPS-Auswertung, um bei einer zu großen Divergenz der beiden Lösungen die Biases neu zu initialisieren)
- Synchronisation der Messdaten (hardware- oder softwaremäßig)
- Untersuchung in wie weit die IMU-Daten die Ambiguitätenfixierung verbessert haben
- Fehlerursachen bei Wendemanövern untersuchen.

Literaturverzeichnis

- Allan, D., Ashby, N., Hodge, C., 1997. The science of timekeeping. Hewlett Packard Application Note 1289.
- Brown, R., Hwang, P. Y. C., 1997. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with Matlab Exercises and Solutions. John Wiley & Sons, New York.
- El-Sheimy, N., Hou, H., Niu, X., Jan. 2008. Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 57 (1), 140–149.
- Gelb, A., 1974. Applied optimal estimation. MIT Press, Cambridge.
- Heine, E., 2006. Positionierungsverfahren für Sohlgrundvermessungen alpiner Flussläufe unter Verwendung von GPS und zielverfolgenden Servotachymetern. VGI-Sonderheft ÖGT 2006, 1–11.
- Heine, E., Mader, H., Mayr, P., Sattler, S., 2005. Hydrographische Vermessung von Gewässersohlen von kleinen und mittelgroßen Flussläufen unter Einsatz gekoppelter GPS / Tachymat-Ortungsverfahren, 1–9.
- Hide, C., Moore, T., Smith, M., Jan. 2003. Adaptive Kalman Filtering for Low-cost INS/GPS. Journal of Navigation 56 (1), 143–152.
- Hou, H., 2004. Modeling inertial sensors errors using Allan variance. Master thesis, University of Calgary.
- IEEE Std 647, 2006. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros IEEE Aerospace and Electronic Systems Society.
- International Hydrographic Bureau, 1998. International Standards for Hydrographics Surveys (Special Publication No. 44, 4. edition).
- Jekeli, C., 2000. Inertial Navigation Systems. Walter De Gruyter, Berlin - New York.
- Lurton, X., 2010. An Introduction to Underwater Acoustics. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg.
- Pilgram, R., 2006. Der Einsatz hydrographischer Messverfahren im Markscheidewesen. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 151 (2), 53–61.
- Reiner, H., Mayr, P., 2009. TPS-DGPS RTK-Echolot Sohlgrundaufnahme des Speicher Wiederschwing. Technischer bericht.
- Tehrani, M., 1983. Ring Laser Gyro Data-Analysis with Cluster Sampling Technique. Proceedings of the SPIE the International Society for Optical Engineering 412, 207–220.

- Wendel, J., Meister, O., Schlaile, C., Trommer, G., Sep. 2006. An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter. *Aerospace Science and Technology* 10 (6), 527–533.
- Wieser, A., 2004a. MATLAB implementation of an extended linearized discrete Kalman Filter. Dissertation.
- Wieser, A., 2004b. Navigation equations of b-frame expressed in e-frame with arbitrary position and orientation of IMU. Technical report, University of Calgary, University of Calgary.
- Wieser, A., 2005. Time tagging with manual time marks or PPS. Technical report, University of Calgary.
- Wieser, A., 2007a. Documentation of KF_run example project 1: Short baseline. Technical report, TU Graz - Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems.
- Wieser, A., 2007b. GPS based velocity estimation and its application to an odometer. Shaker Verlag, Aachen.
- Zobl, F., Brunner, F., Wieser, A., Aug. 2007. Development of a digital geological compass. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 40 (3), 301–308.

Tabellenverzeichnis

3.1	Eigenschaften des Novatel mit OEM-Star Empfänger (Gehäuse: FlexPak-G2) .	14
3.2	Herstellerangaben des Motion PAK II von Systron Donner.	15
4.1	Spektrale Rauschdichte der einzelnen IMU-Kanäle aus 100 Hz Rohdaten abgeleitet.	39
5.1	Position der Sensoren im b-System während des hydrographischen Experiments.	45
5.2	Übersicht über die einzelnen Messfahrten.	48
6.1	Koordinaten der Referenzstation im ITRF 2005.	50
6.2	Verwendete Rauschparameter für die IMU während der Messfahrt.	53
A.1	Verwendete Programme und deren Zweck.	69

Abbildungsverzeichnis

1.1	Hydrographische Vermessung mit Einzelecholot und GPS-RTK. Quelle: FLUSSBAU – MAYR UND SATTLER OEG.	2
2.1	Prinzip-Skizze des Einzelvertikalecholots.	7
2.2	Prinzip-Skizze des Mehrfachecholots.	7
2.3	Prinzip-Skizze des Fächerecholots.	8
2.4	Ein Side-Scan-Sonar montiert an der Bordwand des Messbootes sowie das Ergebnis einer Sonar-Aufnahme. (Quelle: www.terra.ch)	9
2.5	Auswirkung von Positionierungs und Neigungsfehler für die Verortung.	11
3.1	Sensorkomponenten des Messsystems.	12
3.2	Prinzipskizze der Datenaufzeichnung auf dem Messboot und an der Referenzstation.	13
3.3	Novatel FlexPak-G2 Empfänger sowie GPS-Antenne AT575-142 von Aero Antenna.	15
3.4	Motion Pak II von Systron Donner mit Montagerahmen.	16
3.5	8-Stunden-Zeitreihe einer Testmessung der Winkelinkremente des x-Kanals. . .	17
3.6	Abweichung der tatsächlichen Bewegungsrichtung von Kursazimut aufgrund von Strömung.	18
3.7	PPS-Signale des Novatel Empfängers aufgezeichnet mit dem A/D-Wandler. . .	19
3.8	Schematischer Aufbau des Kalmanfilters.	21
3.9	Drehung des b-Systems gegenüber dem Navigationssystem.	22
3.10	Prinzip-Skizze zur Verortung der Echolotaufnahmen durch die geschätzten Roll-, Nick und Gierwinkeln.	31
4.1	Bestimmung der Standardabweichung des weißen Rauschen aus synthetischen Daten (Simulation: $s_x = 0.6$ u, $\Delta t = 0.01$ s.	35
4.2	Gemessene Beschleunigungen am 13.11.2010 mit einer Auflösung von 100 Hz. .	37
4.3	Log-Log-Plot der Allan-Standardabweichung für die Kreiselkanäle der MP II IMU.	38
4.4	Log-Log-Plot der Allan-Standardabweichung für die Beschleunigungskanäle der MP II IMU.	38
5.1	Kinematische Messung mit dem GPS-IMU System am Dach der TU Wien. . .	41
5.2	Befestigung der Sensoren am Messroboter.	41
5.3	Geschätzte Trajektorie aus der GPS-IMU Auswertung der Session 8 am 14.7.2010.	42

5.4	Zoom in die statische Anfangsphase der Session 8 am 14.7.2010. (blau: geschätzte Koordinatenvariationen, rot: $\pm 1\sigma$)	43
5.5	Geschätzter Roll-, Nick und Gierwinkel (mit guten Näherungswerten für den Bias).	44
5.6	Messaufbau der Verortungssysteme auf dem Messboot.	46
5.7	Detailfoto des Messaufbaus.	46
5.8	Eigene Referenzstation auf der Staumauer des Laufkraftwerkes Rosegg.	47
5.9	Überblick über die Messfahrten und die Position der Referenzstation.	49
6.1	Geschätzte Trajektorie und Höhenvariation der 1. Messfahrt aus der trägerphasenbasierten Lösung. (blau: geschätzte Koordinatenvariationen, rot: $\pm 1\sigma$)	51
6.2	Amplitudenspektrum der IMU-Daten während einer statischen Phase im hydrographischen Experiment.	53
6.3	Geschätzte Trajektorie der Messfahrt 1 aus der GPS-IMU Kombination.	54
6.4	Geschätzte Trajektorie der Messfahrt 1 aus GPS-IMU Kombination unter Einbeziehung der Magnetometerdaten und fiktiver Beobachtungen zur Beschränkung der geschätzten Höhe.	55
6.5	Ausschnitt aus der Messfahrt.	55
6.6	Verlauf der horizontalen Geschwindigkeit gegenüber der relativen Geschwindigkeit.	57
6.7	Zusammenhang zwischen Höhenvariation und Relativgeschwindigkeit.	57
6.8	Geschätzte Neigungen des Bootes während der gesamten Beobachtungsdauer.	58
6.9	Triangulation der verorteten Echolotaufnahmen der Gewässersohle.	59
6.10	Digitales Geländemodell der Gewässersohle.	59
6.11	Profilschnitte der Gewässersohle.	60

A Verwendete Programme

Tab. A.1: Verwendete Programme und deren Zweck.

Programm	Quelle	Zweck
Novatel CDU.exe	Novatel	Empfänger-Konfiguration und Datenaufzeichnung auf PC
MT Software Development Kit	XSens	Sensorkonfiguration und Datenaufzeichnung auf PC
readMP.m	EHA	Aufzeichnung der MP II Messdaten über A/D-Wandler
analyseMP.m	EHA	automatische Synchronisation der MP II Daten über PPS-Signale unter Verwendung von evalTimeMarks und getTimeMarks
evalTimeMarks	FG IG	Erstellung eines Zeitmaßstabes aufgrund der extrahierten PPS-Signale
getTimeMarks	FG IG	Extraktion der PPS-Signale aus Zeitreihe
KF_run.m	FG IG EHA	Kalman-Filter Software zur Auswertung von reinen GPS-Beobachtung oder zur Kombination von GPS und INS Beobachtungen Modifikationen für die zusätzliche Verarbeitung von Azimutbeobachtungen und exzentrischen Dopplerbeobachtungen
KF_display.m	FG IG	Darstellung der Trajektorie, Satellitenübersicht, IMU-Biases, Orientierung etc.
KF_mkoCRD.m	FG IG EHA	Beobachtungsgleichung und deren Linearisierung von Positionsbeziehungweise Geschwindigkeitsbeobachtungen Modifikationen für die zusätzliche Verarbeitung von Azimutbeobachtungen
imu_convdat.m	FG IG	Konvertierung der Spannungswerte in Winkelinkremente und Geschwindigkeitsinkremente