Bestimmung von Schiffsbewegungen und anderen hochfrequenten Bewegungen mittels GPS

Peter Andree, Roland Läger, FH Hamburg, FB Geomatik
Martin Schmitz, Gerhard Wübbena, Geo++® GmbH, Garbsen

Zusammenfassung

Die Bestimmung von hochfrequenten Bewegungen im Subzentimeterbereich in quasi Echtzeit erfolgt bisher durch eine Vielzahl verschiedener Meßsensoren. Diese sind meist nur für einen speziellen Fall anwendbar.
So hat die Einführung von Multibeam-Echoloten in der Hydrographie zur Notwendigkeit geführt, Schiffsbewegungen zu messen. Hierzu werden hauptsächlich Inertialmeßsysteme eingesetzt. Zwar weisen diese Systeme eine sehr hohe Taktrate auf, aber abhängig von der Größe des Schiffes, wird dessen Dynamik nicht immer korrekt wiedergegeben. Als weiteres Anwendungsgebiet von GPS zur Bestimmung von Bewegungen ist z.B. die Deformationsmessung an Bauwerken zu nennen.
GPS ist in der Lage, die genannten und andere Fälle in einem einzigen System zu lösen. So sind Taktraten von 10 Hz möglich. Weiterhin gibt es verschiedene Lösungsansätze zu Steigerung der GPS-Genauigkeit, wie die Berücksichtigung von Antennenphasenzentrumsvariationen, um nur eine zu nennen.
Der Beitrag stellt aktuelle Ergebnisse von Untersuchungen dar, die bisher an der Fachhochschule Hamburg, Fachbereich Geomatik, in Zusammenarbeit mit der Firma Geo++®, Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien GmbH durchgeführt wurden.

Bestimmung von Schiffsbewegungen

Mit der Einführung von neuen Meßsystemen in der Hydrographie, wie z.B. Multibeam-Echoloten, ist die Notwendigkeit entstanden, Schiffsbewegungen für die Reduktion der Echolotdaten zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu Singlebeam-Echoloten, die einen gebündelten Schallkegel senkrecht in die Tiefe senden, sind die auch Fächerecholote genannten Geräte in der Lage, mit einer Vielzahl von Schallkegeln (Beams) den Gewässerboden flächenhaft abzutasten. Dies geschieht, indem aus einem oder zwei Schwingern schräg abgestrahlt und empfangen werden kann. Wie aus der Abbildung 1 zu ersehen ist, ist zur genauen Lage- und Tiefenbestimmung die Kenntnis der momentanen Schiffsbewegungen wichtig.

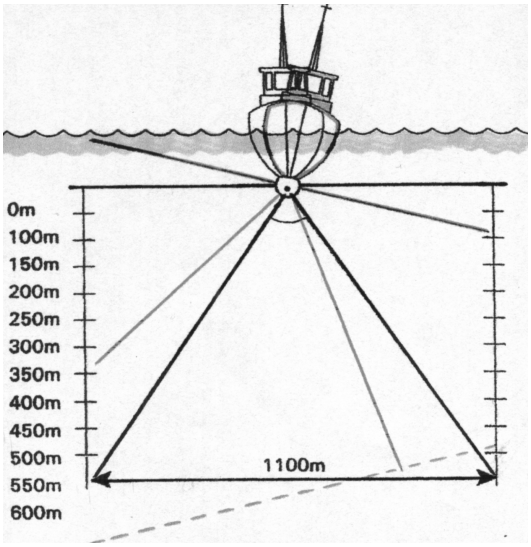

Abb. 1 :

Einfluss von Schiffsbewegungen auf die Echolotdaten-Erfassung.

Ein Schiff hat sechs Freiheitsgrade sich zu bewegen. Zum einen drei Translationen :

- in Rechts- und Hochwert (Position und Kurs über Grund)
- in der Höhe (Heave bzw. Hub)

und zum anderen drei Rotationen :

- um die Längsachse (Roll bzw. Rollen)
- um die Querachse (Pitch bzw. Stampfen)
- um die Hochachse (Heading bzw. Kurs durchs Wasser).

Die dominierende Methode zur Erfassung der Schiffsbewegungen sind inertiale Meßsysteme und Hubsensoren, die über Beschleunigungssensoren die drei Bewegungen (Roll, Pitch und Heave) bestimmen können. Es werden Taktraten von bis zu 200 Hz (digital) und 500 Hz (analog) geliefert. Die Genauigkeit liegt bei 0,05° für Roll und Pitch und 5 cm für den Heave. Inertiale Systeme weisen ein Driftverhalten auf, durch das die Genauigkeit zeitlich abnimmt. Nachteilig ist zudem, dass diese Sensoren auf Kursänderungen empfindlich reagieren und eine Regenerationszeit benötigen. Daraus ergibt sich auch, dass kleinere Fahrzeuge mit schnellen Bewegungen für diese Systeme weniger geeignet sind. Vor allem im Binnenbereich werden aber kleine Meßschiffe eingesetzt.
Die verbleibenden drei Freiheitsgrade werden über eine Ortung (GPS, Polarortung o.ä.) und über einen Kreiselkompass bestimmt. Kreiselkompasse sind ebenso empfindlich gegenüber schnellen Kursänderungen und sind nur bedingt für hohe Breiten geeignet.
Neuere Systeme nutzen zwei GPS-Einfrequenzempfänger um den Inertialmeßsensor zu stützen. Hierzu wird aus relativen Differenzmessungen zwischen den Antennen deren Lage im Raum und somit der aktuelle Kurs des

Schiffes bestimmt. Durch Berücksichtigung der ermittelten Kursänderungen kann die Genauigkeit des Inertialmeßsystems weiter gesteigert werden. Die Verwendung dieses Systems kann außerdem einen Kreiselkompass ersetzen und mittels eines zusätzlichen Zweifrequenzempfängers auch die Position liefern.

Verwendung von GPS

Ziel der Verwendung von GPS muss es sein, die Vielzahl der eingesetzten Sensoren (Inertialmeßsensor, Kreiselkompass und ein Positionierungssystem) durch ein muti-funktionales System basierend auf GPS zu ersetzen.
Die Ortung erfolgt auf vielen Meßschiffen bereits durch GPS (PDGPS bzw. RTK). Es lassen sich so drei der sechs Freiheitsgrade (drei Translationen) bestimmen. Hierfür wird ein Zweifrequenzempfänger mit geeigneter Referenz eingesetzt. Problematisch ist der Heave (Hub). Im Gegensatz zur Position fehlt eine fest definierte Bezugsebene, da Fächerecholote relative Höhenänderungen anstatt absoluter Höhenmessungen verwenden.
Die drei verbleibenden Freiheitsgrade (drei Rotationen) werden am geeignetsten durch Differenzmessungen zwischen den GPS-Antennen bestimmt. Für Roll und Pitch sind dies Höhenunterschiede (dz) und für das Heading Lagedifferenzen (dx, dy). Als Minimalkonfiguration ergibt sich so eine Anzahl von drei GPS-Antennen. Diese werden zweckmäßiger weise in einer Dreiecksform angebracht.

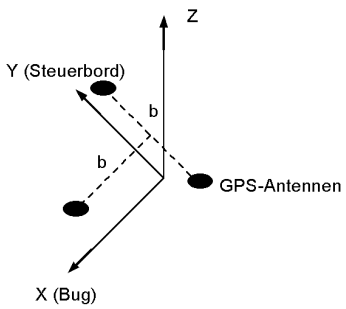

Abb. 2: Schiffskoordinatensystem und GPS-Antennen

Der wichtigste Gesichtspunkt für ein solches System ist die erreichbare Genauigkeit. Forderung sind hier 0,1° für Roll, Pitch und Heading sowie 5 cm für Position und Heave. Mit PDGPS ist die letztgenannte Forderung, abhängig von äußeren Umständen (Entfernung zur Referenzstation usw.), zu erfüllen.
Für die Rotationen zeigt sich anhand der Bogenformel, dass die erreichbare Genauigkeit von zwei Faktoren abhängt. Zum einem ist dies die Bestimmung der Differenzen und zum anderen der Abstand der zwei GPS-Antennen. Der Abstand oder auch die Basislänge ist durch die Größe des Schiffes beschränkt. Für kleine Meßschiffe sind hier 3 - 6 Meter zu erzielen. Daraus ergibt sich, dass bei einer drei

Meter langen Basis die Differenzen besser als 5 mm, bei 6 Metern besser als 10 mm bestimmt werden müssen. Wie später gezeigt wird ist dies möglich.
Eine weitere Forderung ist eine hohe Taktrate. Diese ergibt sich aus der Lotfolge des Fächerecholotes, welche bis zu 20 Hz erreichen kann. Das GPS-System sollte eine ähnliche Taktrate erreichen.
Somit sind die Forderungen für ein solches System klar. Die absolute Genauigkeit der Positionsbestimmung für die drei Translationen sollte im unteren Subdezimeterbereich liegen. Die relative Genauigkeit für die drei Rotationen, muss um etwa eine Zehnerpotenz (Subzentimeterbereich) besser sein.

Messkonzept

Für Test- und Vergleichsmessungen wurde folgende Konfiguration gewählt :

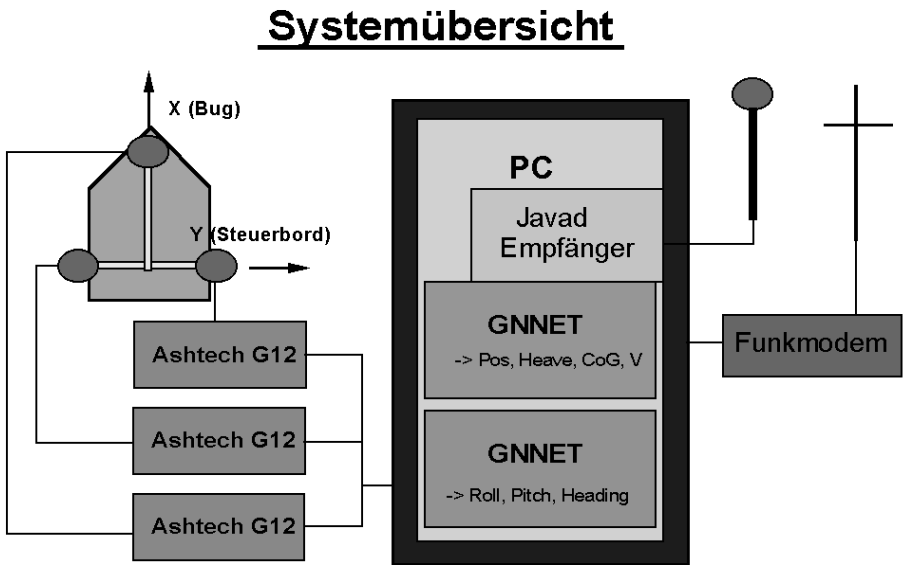

Abb. 3 : Systemübersicht der Versuchskonfiguration

Wie zu erkennen ist wurden drei GPS-Einfrequenzempfänger vom Typ Ashtech G12 und ein GPS/GLONASS-Zweifrequenzempfänger von Javad genutzt. Die Datenerfassung und -verarbeitung erfolgte in einem portablen PC, in welchem auch der Javad-Empfänger als OEM-Karte integriert ist. Das Programmodul GNNET-RTK der Firma Geo++ prozessierte die Daten.
Grundlage von GNNET-RTK ist ein modulares Konzept, das sämtliche GPS-Beobachtungsdaten verwenden kann. GNNET-RTK ermöglicht über eine herkömmliche RTK-Lösung hinaus die simultane Verarbeitung von mehreren Referenz- und Mobilstationen in Echtzeit. Die Mutistationslösung bietet gegenüber der parallelen Basislininenauswetung mehrerer RTK-Empfänger Vorteile hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Durch Einbeziehen von z.B. orientierten Antennenkorrekturen werden hochgenaue Positionen erhalten. Durch besondere

Auswertealgorithmen sind neben Koordinaten auch Koordinatenänderungen bestimmbar, die zur permanenten Berechnung von Schiffsbewegungen, aber auch von Deformationanalysen in Echtzeit nutzbar sind.

Fehlerquellen

Der Fehlerhaushalt von GPS unterteilt sich in den entfernungs- und den stationsabhängigen Anteil. Als Fehlerquellen für die absolute Positionsbestimmung, sind die entfernungsabhängigen Fehler Ionosphäre, Troposphäre und Satellitenbahnfehler zu nennen. Die entfernungsabhängigen Fehler lassen sich durch vernetzte Referenzstationen in Echtzeit modellieren und als zusätzliche Korrekturen an den Nutzer übertragen. In den vorliegenden Untersuchungen wurden die Entfernungen generell gering gehalten, so dass mit einer Referenzstation gearbeitet werden konnte. Für die hier diskutierten Anwendungen sind die stationsbedingten Fehler Phasenzentrumvariationen (PCV) der Empfangsantenne und Multipath von größerer Bedeutung. PCV können durch Kalibrierungen bestimmt und während der Messungen angebracht werden. Absolute Antennenkalibrierungen aus Feldmessungen (Wübbena et al. 1997) liefern elevations- und azimutabhängige PCV für die gesamte Antenne bis zum Horizont. Heutige Rover-Antennen weisen häufig geringe PCV und geringe Elevations- und Azimutabhängigkeit auf (Wübbena et al. 2000). Generell können Variationen in der Größenordnung bis zu 2.5 cm auftreten. Die eingesetzten Antennen wurden absolut kalibriert, zeigen jedoch lediglich Variationen im Bereich von ca. +/- 1 mm und bis zu 3 mm am Horizont.

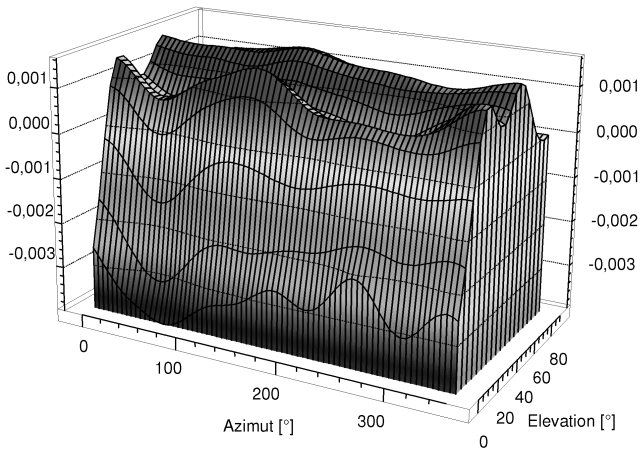

Abb. 4: Absolute L1 PCV-Korrekturen einer Ashtech Marine III L1 Antenne

Multipath stellt gegenwärtig einen limitierenden Faktor bei der erzielbare Genauigkeit von GPS-Echtzeitanwendungen dar. In allgemeinen wird Multipath nur durch die Wahl der Antennenorte berücksichtigt und durch die sich ändernde Schiffsbewegungen an sich reduziert. Für statische Anwendungen können spezielle Ansätze zur Reduktion bzw. Elimination von Multipath angesetzt werden (siehe

Deformationsmessungen).

Genauigkeitsuntersuchung

Um ein Meßgerät zu überprüfen sollte das prüfende System um etwa eine Zehnerpotenz genauer sein. In Anbetracht der oben genannten Werte für die relative Höhenmessung (besser 5 mm) zeigt sich, dass hier eine Auflösung besser als ein Millimeter erreicht werden muss. Hinzu kommt, dass es sich um einen Bewegungssensor handelt, der letztlich auch nur in Bewegung überprüft werden darf, um sichere Aussagen treffen zu können. Aus der Dynamik entsteht noch die Notwendigkeit der Zeitsynchronisation der beiden Systeme. Sie müssten bei Bewegungen, die mit Geschwindigkeiten von etwa einem Meter pro Sekunde erfolgen, auf mindestens eine Millisekunde genau zusammenarbeiten. Eine weitere wichtige Bedingung ist, dass ein solches System selbstverständlich im Freien arbeiten können und somit wetterfest sein muss.
Aus diesen Gründen wurde ein Roboterarm gewählt, der hochpräzise vordefinierte statische Stellungen einnehmen kann. Dieser Roboterarm wird normalerweise für die schon oben beschriebene PCV-Kalibrierung genutzt. Aus seiner eigentlichen Bestimmung rührt auch sein einziger Nachteil her. Die Bewegung zwischen den einzelnen Positionen ist z.Z. nicht mit der gleichen Genauigkeit wie in statischen Stellungen bekannt.
Deshalb erfolgte ein Vergleich des GPS-Systems zusätzlich mit einem präzisen Intertialmeßsensor. Die Funktion und Genauigkeit des Bewegungssensors wurde mittels der Sollpositionen des Roboterarms überprüft.
Danach wurde folgende in den Abbildungen zu erkennende Konfiguration gewählt.

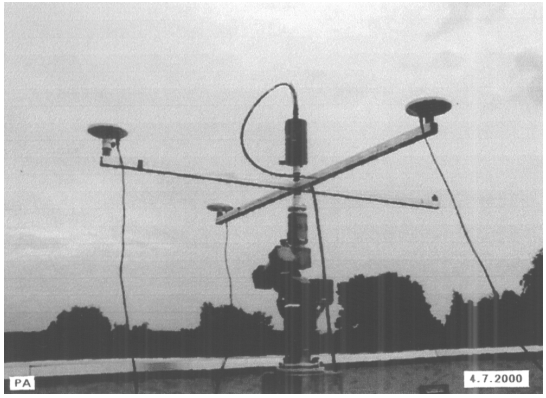

Abb. 5 : Roboterarm mit Antennenkreuz und Inertialmeßsensor

Abb. 6 : geneigter Roboterarm mit Inertialmeßsensor

Auf den Roboterarm befindet sich ein Kreuzgestell mit drei GPS-Antennen, wie es auch schon auf Testfahrten mit Meßschiffen eingesetzt wurde. In der Mitte dieses Kreuzes ist ein Bewegungssensor der Firma TSS vom Typ DMS2-05 installiert, der mit einer Winkelgenauigkeit von 0,05° angegeben ist.

In den Testmessungen wurden die Winkelangaben der beiden Systeme und die Sollpositionen des Roboterarms aufgezeichnet. Die Zeitstempelung der Daten erfolgte über GPS-Zeit. Der Arm bewegte sich zwischen +10° und -10° , um so eine Rollbewegung eines Schiffes zu simulieren.

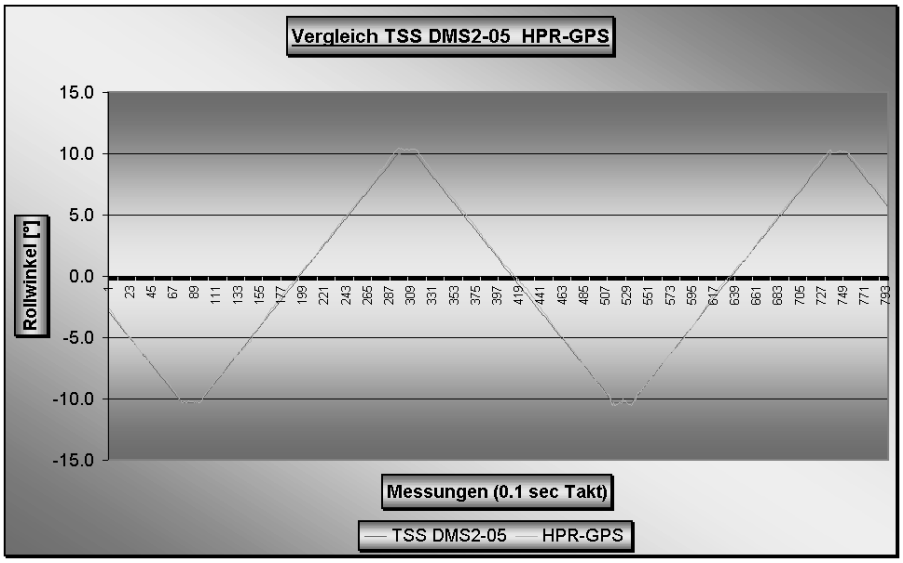

Abb. 7 :

Vergleich TSS DMS2-05 HPR-GPS

Wie in Abb. 7 zu erkennen ist, lieferten beide Systeme Daten, die von groben Ausreißern frei sind. Weiterhin zeigt sich, dass beide Systeme leicht zu große Auslenkungen anzeigen. Dies ist auf die eingesetzte Prädiktionsfilter zurückzuführen, die das abrupte stoppen des Roboterarms nicht korrekt wiedergeben können.
Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt der vorhergehenden Abbildung.

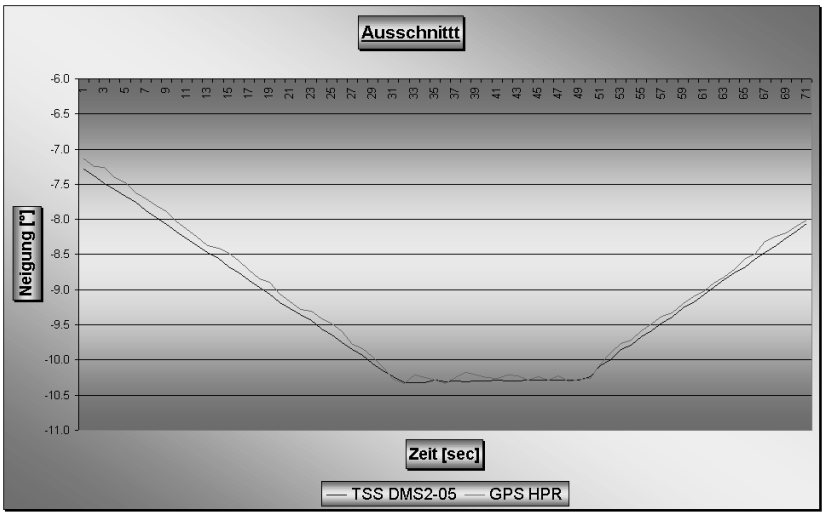

Abb. 8 :

Ausschnitt an einem Wende-punkt

Es wird deutlich, dass das GPS-System und der Bewegungssensor durchschnittlich etwa 0,1° differieren. Die Abweichung beider vom Sollwert 10° ist auf eine nicht ganz exakte Montage des Gestells zurückzuführen.
Für eine fehlertheoretische Betrachtung erscheinen anhand der obigen Grafiken beide Sensoren als gleichwertig. Deshalb wurde eine Standardabweichung nach der Formel für Differenzen aus Doppelmessungen berechnet und es ergab sich

folgender Wert : $s = \sqrt{\frac{[dd]}{2n}} = 0{,}11°$

Dieser Wert entspricht den oben genannten Forderungen.

Einsatz des GPS-Systems am Walchensee

Der Prinzipielle Nachweis der Funktionalität konnte bei Messungen auf dem Walchensee erbracht werden. Hier ersetzte das System zunächst für die komplette Vermessung des Sees den Kreiselkompass. Abschließend erfolgten noch Versuche, in welchen das GPS-System auch zur Kompensation von Heave, Roll und Pitch eingesetzt wurde.

Schon während der Messung zeigte es sich, dass das System störungsfrei lief und plausible Werte erzeugte. Aus den in der Versuchsmessung erzeugten Koordinatentriplen konnte ein digitales Geländemodell berechnet werden. Schnitte durch dieses Modell und das der Komplettvermessung des Sees ergaben zwar Differenzen in der Tiefenmessung, es zeigte sich aber auch, das die morphologie des Gewässerbodens richtig erfaßt wurde. Daraus kann man auf die korrekte Funktion der Heading-, Roll- und Pitchkompensation schliessen. Die Tiefendifferenzen sind vor allem auf Probleme
bei der Bestimmung der Wasserschallgeschwindigkeit zurückzuführen.

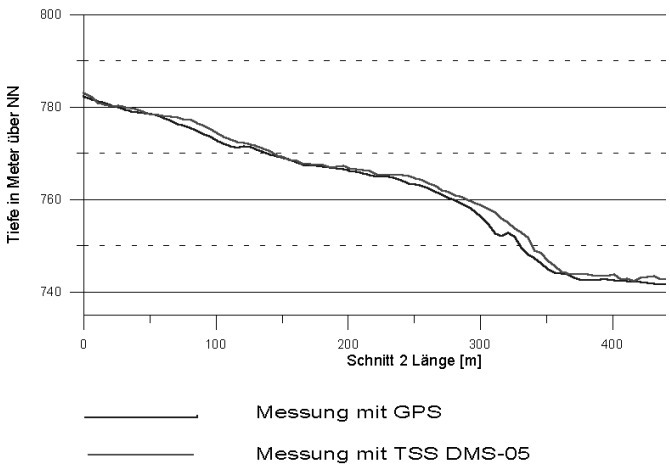

Abb. 9 : Vergleichsmessung Inertialmeßsensor und GPS-HPR

Deformationsmessung am Eidersperrwerk

Als weiteres Anwendungsbeispiel zur Erfassung von Bewegungen mit GPS seien die Deformationsmessungen am Eidersperrwerk genannt. Diese wurden von der Fachhochschule Hamburg FB Geomatik unter der Leitung von Prof. Peter Andree in Zusammenarbeit mit der Firma Geo++® durchgeführt.

Die Erfassung von Bauwerksdeformationen erfolgt im allgemeinen durch relative

physikalische Messverfahren unter Anwendung von EDM's, Neigungsgebern, Weggebern, Druckmesseinrichtungen usw. Daraus resultiert das nur Bewegungen zwischen zwei Punkten bestimmt werden können.
Geodätische Absolutmessungen setzen lage- und höhenstabile Ausgangspunkte voraus, welche in unmittelbarer Nähe von Bauwerken meist nicht vorhanden sind. Die Folge sind weiträumige und kostspielige Koordinaten- und Höhenübertragungen.
Wie bei den Schiffsbewegungen muss auch hier das Ziel sein, mittels GPS ein kompaktes System zu schaffen, das diese Aufgabe lösen kann.
Grundsätzlich werden die gleichen Verfahren wie zur Bestimmung von Schiffsbewegungen eingesetzt um ausreichende Genauigkeiten zu erreichen. Die eingesetzten Antennen wurden durch individuelle absolute PCV korrigiert. Wesentlicher limitierender Faktor der permanenten Deformationsmessungen sind Multipath-Effekte. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, werden siderische Tagesdifferenzen verwendet. Multipath wiederholt sich nach genau einem siderischen Tag aufgrund der wiederkehrenden Satellitenkonstellation, so dass in Tagesdifferenzen der Multipath deutlich reduziert bzw. eliminiert werden kann (Seeber et al. 1998).
Das Messverfahren zur Deformationsmessung besteht aus einer GPS-Multistationslösung in Echtzeit mit geeigneter Referenzstation. Hierzu wurde das Programmmodul GNNET der Firma Geo++® eingesetzt. So war es möglich mehrere Objektpunkte gleichzeitig mit einer Frequenz von 5 Hz absolut zu koordinieren. Die Deformationsanalyse erfolgte in Echtzeit durch die Bildung siderischer Differenzen.
Die Messungen zeigten, dass keine signifikanten Lageänderungen statt fanden. Es ergab sich jedoch eine Höhenänderung von 5 mm.

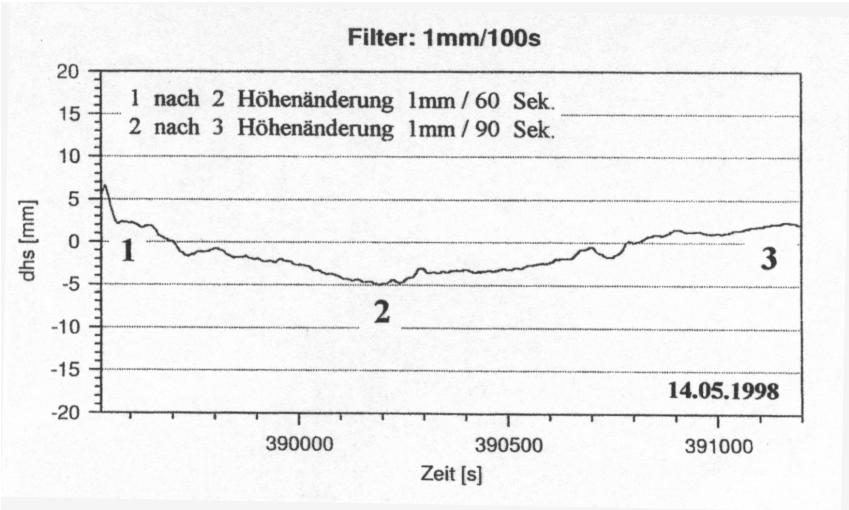

Abb. 10 : Darstellung der Höhenveränderungen

Es kann eine Korrelation zwischen Wasserstand und Vertikalbewegung vermutet werden. Hierzu ist zu sagen, dass die Messungen bei normalen Tidenverhältnissen erfolgten und vermutete Bewegungen im Sturmflutfall so nicht ermittelt werden

konnten.

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten

Wie die Genauigkeitsuntersuchung gezeigt hat, ist ein GPS-System für den Einsatz bei Fächerecholoten geeignet, wenn es auch zwei Schwachpunkte aufweist. Zum Einen ist dies die Möglichkeit der Abschattung und zum Anderen die im Vergleich zu Intertialmeßsensoren niedrige Taktfrequenz. Obwohl letztere mittlerweile auf 20 Hz gesteigert werden kann, geben viele Fächerecholothersteller sich hiermit noch nicht zufrieden.
Berücksichtigt man die oben genannten Punkte, erscheint eine Kombination aus Intertialmeßsensor und GPS-System sinnvoll. Beide Sensoren könnten durch eine Ausgleichung verbunden werden, wobei das Gewicht des Intertialmeßsensors je nach Güte der GPS-Messungen variieren würde und dieser als "Lückenfüller" dienen könnte. So wäre es möglich höhere Taktraten zu erreichen.
Im Bereich der Deformationsmessung sind aufgrund der Entwicklung höhere Taktraten (>10 Hz) zu erreichen. In Zusammenhang mit einer Fernabfrage ist es weiterhin möglich dieses System zur permanenten Bauwerksüberwachung einzusetzen.

Der Roboterarm wurde in einem laufenden Forschungsprojekt des Instituts für Erdmessung, Universität Hannover und Geo++® angeschafft, das vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gefördert wird (50NA9809).

Andree, P. (1999). Hochpräzise Bestimmung räumlicher Objektbewegungen mittels GPS. Vortrag anläßlich des Forschungstages der FH Hamburg 5/1999.

Läger, R. (2000). Bestimmung von Schiffsbewegungen mittels GPS. Eingereicht Hydrographentag 2000 in Bremerhaven.

Seeber, G., F. Menge, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1998). Precise GPS Positioning Improvements by Reducing Antenna and Site Dependent Effects. In: Brunner (Ed.). *Advances in Positioning and Reference Frames, IAG Symposia*, Vol. 118, Rio de Janeiro, Brasil, September 3-9, 1997, Springer Verlag.

Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, G. Seeber, C. Völksen (1997). A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations. *Navigation*, Journal of The Institut of Navigation, Vol. 44, No. 2, Summer 1997, USA.

Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000). Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. *ION GPS-00*, Salt Lake City, Utah, USA, September 19-22, 2000.