

# Ein Beitrag zur Kalibrierung des ENVISAT-Radaraltimeters mit Hilfe von GPS-Hochseebojen

Torben Schüler

## Zusammenfassung

Der im März 2002 erfolgreich von der Raumfahrtorganisation ESA gestartete Umweltsatellit ENVISAT verfügt – neben einer Reihe weiterer Sensoren – über ein Radaraltimeter, das den Höhenunterschied zwischen Meeressoberfläche und Satellit mit einer Präzision von wenigen Zentimetern messen kann. Da derartige Messgeräte einen systematischen Fehler aufweisen, der nicht zuvor mit Hilfe von Laborversuchen bestimmt werden kann, muss eine aufwändige Messkampagne zur Bestimmung der Gerätekonstanten durchgeführt werden. Dieser Beitrag erläutert ein Verfahren, den Fehler des Radaraltimeters unter Nutzung von GPS-Hochseebojen zu bestimmen und stellt wesentliche Ergebnisse vor.

## Summary

*The environmental satellite ENVISAT was successfully launched by the European Space Agency ESA in March 2002 and carries – among other sensors – a radar altimeter which is capable of measuring the height between sea surface and satellite with a precision of a few centimetres. Unfortunately, radar altimeters of this kind exhibit a bias which cannot be determined a priori with help of laboratory measurements. Consequently, an elaborate field campaign is to be conducted in order to recover the altimeter's offset. This report describes the efforts carried out to measure this bias with the help of high-sea buoys which are equipped with GPS-receivers and presents important results.*

## 1 Einführung

Vor der wissenschaftlichen Nutzung der Radaraltimeterdaten des Satelliten ENVISAT ist die genaue Kalibrierung dieses Sensors unabdingbar. Das Grundprinzip ist denkbar einfach: Wenn exakte Informationen über die tatsächliche Meereshöhe während eines Überfluges des Satelliten vorliegen und gleichzeitig die präzise Position von ENVISAT bekannt ist, so kann die Sollstrecke zwischen Meeressoberfläche und Satellit ermittelt und mit der Altimetermessung verglichen werden. Die Orbitbestimmung wird in diesem Fall mit Hilfe des französischen Dopplersystems »DORIS« sichergestellt. In der Nachbearbeitung können Satellitenpositionen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern errechnet werden.

Bezüglich der Bestimmung der Meereshöhe sind verschiedene Varianten denkbar: Beispielsweise bilden Gezeitenpegel eine einfache Möglichkeit der Meereshöhen erfassung (Mitchum 1992). Neben dieser klassischen Methode basieren die wichtigsten Alternativen auf der

Nutzung des Global Positioning Systems (GPS). So wäre beispielsweise die Nutzung auf vorgeschobenen Leuchttürmen (Francis u. a. 1993) oder Bohrinseln (Christensen u. a. 1994) denkbar, oder aber die Nutzung von Bojen als Plattformen für die GPS-Empfänger (Born u. a. 1994). Letztere Variante kam bei der ENVISAT-Altimeter-Kalibrierung durch Realisierung zweier Ansätze zum Einsatz: Während eine Arbeitsgruppe an der Universität von Barcelona GPS-Messungen auf Minibojen durchführte, die bei Bedarf an Ort und Stelle ausgesetzt und nach dem Überflug des Satelliten wieder eingeholt wurden, nahm das Institut für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr München den Versuch, hochseetüchtige Bojen dauerhaft während der gesamten Messkampagne an einem bedeutsamen Kreuzungspunkt des Altimeter-Satelliten zu positionieren.

Durch eine dauerhafte Verankerung kann die Wirtschaftlichkeit des Projektes erhöht werden. Die GPS-Trägerphasen-Lösungen gewährleisten eine Höhengenauigkeit im Bereich von ungefähr 1 bis 3 cm, allerdings gestaltet sich die Höhenreduktion im Vergleich zu den nicht autark arbeitenden Minibojen problematischer, da die vorhandenen Exzentrizitäten auf Grund der verwendeten größeren Bojen zwangsläufig einen stärkeren Einfluss auf das Fehlerbudget haben werden.

Im Vergleich zur Nutzung der Gezeitenpegel kann bei dem Einsatz von Hochseebojen auf einen wichtigen Vorteil verwiesen werden: Die meisten der für die ENVISAT-Kalibrierung genutzten Pegelstationen befinden sich in Küstennähe, wo es zu Aufstaueffekten der Wassermassen kommt, die gegenwärtig zum Teil nur schwer modelliert werden können. Vorgelegte Ergebnisse anlässlich des »ENVISAT Validation Review« (ESRIN, Frascati, Italien, 9. bis 13. Dezember 2002) zeigen deutliche systematische Fehler in den angebrachten geophysikalischen Korrekturen bei den Gezeitenpegeln auf, die zum Teil auf derartige Aufstaueffekte zurückgeführt werden können. Die mit GPS ausgerüsteten Hochseebojen hingegen können an Orten in der offenen See positioniert werden, die bezüglich der angesprochenen Problematik einfach zu modellieren sind.

Die Ableitung präziser Meereshöhen an einem ENVISAT-Kreuzungspunkt erfolgte unter Nutzung einer nahe gelegenen, für dieses Projekt installierten Referenzstation, die gleichsam auch für die Aktivitäten zur Kalibrierung des Radiometers auf ENVISAT genutzt wurde, da GPS ebenfalls die genaue Bestimmung troposphärischer Laufzeitverzögerungen erlaubt. Weiterhin wurde der Versuch unternommen, die Bojen über lange Basislinien kinematisch zu positionieren. Diese Methode würde – falls sie

zu ausreichend genauen Höhenwerten führt – die Wirtschaftlichkeit weiter erhöhen, da die Infrastruktur bzgl. der Referenzstationen ausgedünnt werden könnte bzw. mehr Kreuzungspunkte zur Kalibrierung benutzt werden könnten.

## 2 Planung und Realisierung

Das Projekt begann im Januar 2001 mit der Vorstellung des technischen Entwurfes bei der ESA-Forschungseinrichtung ESTEC in den Niederlanden und stand von Anfang an unter hohem Zeitdruck. Der avisierte Zeitplan sah einen Beginn der Messkampagne bereits im Juni/Juli 2001 vor. Durch die missglückte Ariane-5-Mission im August 2001 entspannte sich der Zeitplan in akzeptabler Art und Weise, da durch diesen Zwischenfall ENVISAT erst im März 2002 auf seinen Weg ins All gebracht werden konnte. Fast zur gleichen Zeit erfolgte dann auch die Auslegung der Bojen.

### 2.1 Kalibriergebiet

Als Kalibriergebiet wurde gemäß Abb. 1 der im Mittelmeergebiet nordwestlich vor Menorca liegende Kreuzungspunkt gewählt, der eine Reihe von Vorteilen miteinander verbindet (Francis und Roca 2000): Bei einer Intensivmessphase von weniger als 9 Monaten erfolgt nur eine geringe Zahl an Überflügen über einem ausgewählten Punkt. Der gefundene Ort vereinigt aufsteigende und absteigende Knoten des Satelliten, was zur Erhöhung der Anzahl an Überflügen führt. Die Meerestiefe hält sich mit ca. 120 m in einem technisch beherrschbaren Rahmen. Die auf dem Gebiet einer Kläranlage errichtete Sta-

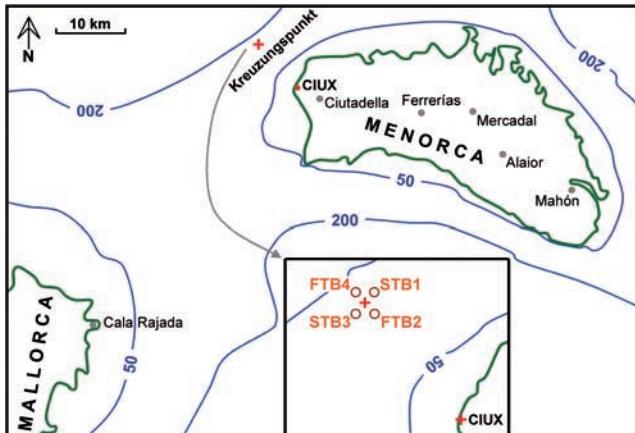


Abb. 1: Die Kartenskizze zeigt die Insel Menorca sowie den östlichen Teil Malloras. Das Kalibriergebiet befindet sich nordwestlich der Stadt Ciutadella, wobei die Sollpositionen der GPS-Bojen symmetrisch um den Kreuzungspunkt angeordnet sind (FTB: Fastonne, STB: Solarleuchttonne). Die Entfernung zur Referenzstation »CIUX« liegt im Bereich zwischen 8 und 9 km.

tion (CIUX) weist eine Distanz von weniger als 10 km zu den Bojen auf, was zur Reduktion atmosphärischer Stör-einflüsse führt und somit die Lösung der Phasen-Mehrdeutigkeiten vereinfacht, so dass eine hochgenaue kinematische GPS-Trägerphasen-Lösung zu allen Überflügen praktisch garantiert werden kann.

### 2.2 Eingesetzte Hochseebojen

Die vor Menorca eingesetzten Fasstonnen (FTB2 und FTB4) entsprechen den Sicherheitskriterien der zuständigen Hafenbehörden, die auf Grund des vorhandenen Schiffsverkehrs neben Seelicht und Sichtzeichen auch einen Radarreflektor forderten. Da von diesem Typ nur zwei Bojen bereitgestellt werden konnten, musste mit den zwei Solarleuchttönen (STB1 und STB3) vom Modell »FTW71« auch auf alternative Träger zurückgegriffen werden, die sich jedoch nicht als ausreichend hochseetüchtig erwiesen und deshalb keinen bemerkenswerten Beitrag zur Kalibrierkampagne leisten konnten. Nachfolgend wird deshalb ausschließlich auf die »Großen Fasstonnen« eingegangen.

Eine dieser vom Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven bereitgestellten Forschungsbojen mit der Kennung »FTB2« zeigt Abb. 2. Die 2300 kg schweren Tonnen bestehen aus einem 3 m langen zylindrischen Hohlkörper mit

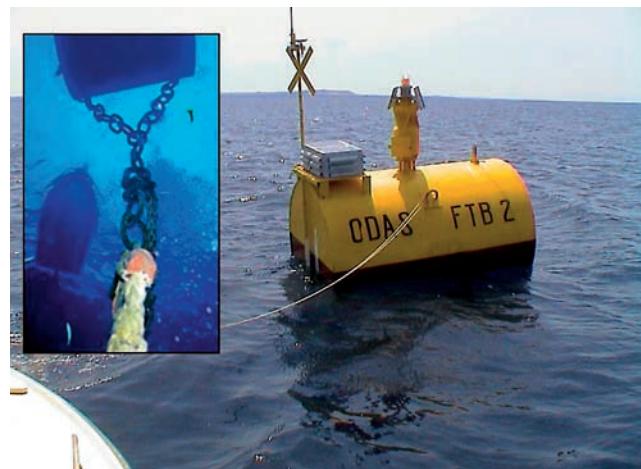


Abb. 2: Große Fastonne FTB2 im Einsatz vor Menorca mit Sichtzeichen, Antennen und Sensorbox auf der linken Seite sowie Seeleuchte mit Radarreflektor in der Mitte. Die links abgebildete Unterwasseraufnahme zeigt die zur Stabilisierung dienende V-förmige Stahlkette mit dem abwärts angeschlossenen Textilseil.

einem Durchmesser von 2 m und erwiesen sich für die beabsichtigte Anwendung als sehr gut geeignet. Als Verankerung kommen hochfeste Textilseile aus einer Kombination von Polyester und Polypropylen zum Einsatz.

Die auf der linken Seite der Tonne sichtbare Plattform für die Bordelektronik wurde nachträglich angebracht. Auf dieser Bojenseite befinden sich auch das Sichtzeichen mit Telemetrie- und GPS-Antenne sowie – an der

Außenseite angebracht – die Drucksensorstange zur Bestimmung der Eintauchtiefe. Alle technischen Einrichtungen werden mit Hilfe eines über Solarzellen gespeisten Akkumulators mit Energie versorgt. Aufgezeichnete Daten sowie Positionsmeldungen werden täglich per Funkmodem zur nahe gelegenen Referenzstation übermittelt.

### 2.2.1 Sensor-Technik

Alle verwendeten Sensoren werden mit einer Datenrate von 1 Hz ausgelesen. Die Synchronisation der Daten erfolgt mit Hilfe der bekannten Übertragungsgeschwindigkeit der einzelnen seriellen Schnittstellen.

Bei den verwendeten GPS-Empfängern handelt es sich um 2-Frequenz-Geräte des Herstellers NovAtel (OEM4-Plattform). Die GPS-600-Antennen dieser Firma sind deutlich kleiner und leichter als herkömmliche Choke-Ring-Antennen, sollen laut Hersteller-Angaben aber über ein entsprechend geformtes Antennenmuster die Wirkung des Mehrwege-Effektes ebenfalls wirksam reduzieren.

Der kapazitive Neigungsmesser arbeitet verschleißfrei und liefert vollwertige Lageinformationen (zweiachsige Neigungsmessung), die zur Reduktion der GPS-Antennen-Höhe auf den Meeresspiegel benötigt werden. Die Genauigkeit der Winkelmessungen kann bei ruhiger See mit etwa  $\frac{1}{2}$  bis 1 Grad angesetzt werden, was eine Unsicherheit in der Höhenreduktion von 1 bis 2 cm verursacht.

Schließlich dient ein Drucksensor noch zur Ermittlung der Eintauchtiefe der Boje. Er bildet somit das noch fehlende Verbindungsstück zu einer vollständigen Reduktion der GPS-Höhen auf den Meeresspiegel. Der verwendete Sensor hat gemäß Herstellerangaben eine Genauigkeit von 0,1 % bei einem Druckbereich bis 1 psi, was ungefähr einer Eintauchtiefe von 70 cm entspricht.

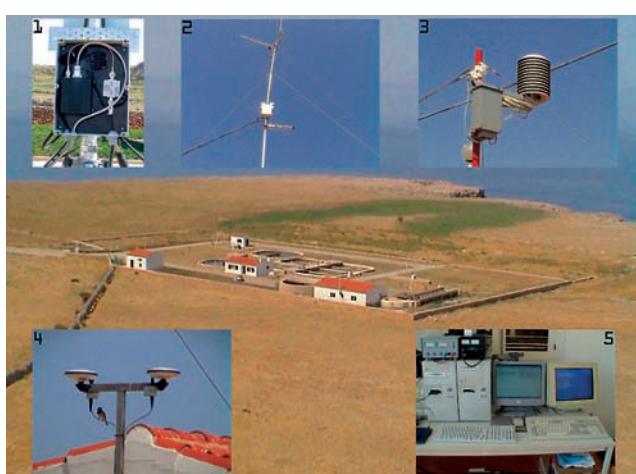


Abb. 3: Gelände der Referenzstation in der Nähe der Stadt Ciutadella mit einigen der installierten Komponenten (1: telemetrische Einrichtung, 2: Sende- und Empfangsmast, 3: meteorologische Station, 4: GPS-Antennen, 5: Kommunikations- und Aufzeichnungs-Computer).

### 2.3 Ausstattung der Referenzstation

Die nordwestlich der Stadt Ciutadella gelegene Referenzstation befindet sich auf einem Felsplateau in unmittelbarer Nähe der Küste, was zu einer hervorragenden Stabilität der Datenfunkstrecke führt. Abb. 3 illustriert die wesentlichen Komponenten der Station.

Als GPS-Empfänger kommen auf der Referenzstation zwei NovAtel OEM3-Zweifrequenz-Geräte zum Einsatz, die zusätzlich noch auf den Empfang von WAAS bzw. EGNOS-Signalen ausgelegt sind. Sie werden durch eine meteorologische Sensorstation vom Typ Vaisala PTU200 mit redundant ausgelegtem Drucksensor ergänzt. Die Übermittlung der gesammelten Daten an die Universität der Bundeswehr München erfolgt mit Hilfe eines GSM-Mobilfunk-Modems.

## 3 Datenverarbeitung und Ergebnisse

Für die Auswertung der Referenzstationsdaten wird die Software TropAC herangezogen (Schüler 2001), die auf der Auswertung doppelter Differenzen beruht und ursprünglich für die Schätzung von troposphärischen Laufzeitverzögerungen entwickelt wurde, jedoch auch zur genauen Koordinatenbestimmung benutzt werden kann. Das Analysepaket beinhaltet ein auf Kalman-Filterung basierendes Programmmodul zur Auswertung statischer Netzwerke und wird seit 2002 durch ein kinematisches Ausgleichsmodul ergänzt, das auch die Positionierung sich bewegender Plattformen über lange Basislinien ermöglicht. Erste Ergebnisse werden in diesem Kapitel präsentiert.

Die Referenzlösung bzgl. der kinematischen Bojenpositionen wurde mit dem kommerziellen Programmpaket GeoGenius erstellt, dessen Entwicklung an der Universität der Bundeswehr unter dem Namen Topas begann.

### 3.1 Referenzstation

Die mit TropAC gewonnenen mittleren Stationskoordinaten entstammen im Wesentlichen der Anbindung an die relativ nahe gelegene EUREF-Permanentstation auf Mallorca (MALL) sowie weiteren Stationen an der spanischen Küste.

#### 3.1.1 Höhenbestimmung

Die für dieses Projekt entscheidenden ellipsoidischen Höhen der beiden auf der Referenzstation verwendeten GPS-Antennen betragen, bezogen auf die Referenzepoch 2002,55 im ITRF2000, für den ersten Empfänger (CIU1) 81,303 m und für das zweite System (CIU2) 81,309 m. Die Standardabweichung der Höhenkomponente kann mit 2 mm abgeschätzt werden. Bei einer Quasi-Geoidhöhe von rund 49,3 m (Denker und Torge 1998) ergibt sich somit eine Normalhöhe von knapp 30 m.

### 3.1.2 Troposphärische Laufzeitverzögerungen

Zusätzlich wurden die zur Kalibrierung des Radiometers benötigten Troposphärenparameter in Form von stündlich geglätteten totalen troposphärischen Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung (ZTD) durch Erweiterung des Netzes um die entfernt liegenden Stationen Potsdam (POTS) und Wettzell (WTZR) bestimmt, da die genaue Bestimmung der Laufzeitverzögerungen bei Nutzung doppelter Differenzen einen ausreichend großen Netzwerkdurchmesser voraussetzt (Duan u. a. 1992; Schüler 2001, S. 166).

Ein interner Vergleich zwischen den beiden Empfängern CIU1 und CIU2 zeigt eine aus den Differenzen berechnete Standardabweichung von 5,5 mm – siehe Tab. 1 – bei einer sehr kleinen mittleren Differenz (systematischer Anteil) von 0,2 mm. Das vom Programmsystem TropAC unterstützte globale Wettermodell (NOAA/NCEP GDAS), dessen Ausgabefelder eine horizontale Auflösung von  $1^\circ \times 1^\circ$  besitzen, zeigt eine Standardabweichung von etwa 15,5 mm mit einem zumindest teilweise auf das Wettermodell zurückzuführenden systematischen Fehleranteil von rund 5 mm. Ein Wert von 15 mm markiert die typische Genauigkeit des ZTD bei Extraktion aus den verwendeten dreidimensionalen Wetterfeldern in mittleren Breiten. Schließlich ergibt sich eine Standardabweichung von 9,1 bzw. 9,6 mm bzgl. der feuchten Komponente (ZWD) im Vergleich mit terr. Radiometerdaten, wobei beachtet werden muss, dass die Retrieval-Koeffizienten des Radiometers aus Radiosondenaufstiegen in Palma de Mallorca gewonnen wurden und daher von Restunsicherheiten in diesen Kalibrierwerten ausgegangen werden muss. Eine höhere Genauigkeit des Radiometers im Vergleich zu GPS kann somit nicht pauschal unterstellt werden, doch entspricht auch hier der Grad der Übereinstimmung typischen Erfahrungswerten.

## 3.2 Bojenpositionierung

Die mit dem kinematischen Ausgleichungsmodul des Programmsystems TropAC über kurze und lange Basislinien gewonnenen GPS-Antennenhöhen werden nachfolgend mit den Ergebnissen des kommerziellen Paketes GeoGenius verglichen. Dessen Referenzlösung stützt sich grundsätzlich auf die kurzen, 8 bis 9 km langen Basislinien und kann daher als von hoher Genauigkeit betrachtet werden. Exemplarisch werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse für Forschungsboje FTB2 dargestellt.

### 3.2.1 Kurze Basislinien

Bei den mit TropAC im automatischen Modus generierten Positionslösungen wurden vornehmlich die im Vergleich zur L2-Frequenz präziseren L1-Daten genutzt, wenngleich zusätzlich die L2-Trägerphasen zur Erkennung von Phasensprüngen einbezogen wurden. Eine Glättung der Trajektorien erfolgte nicht.

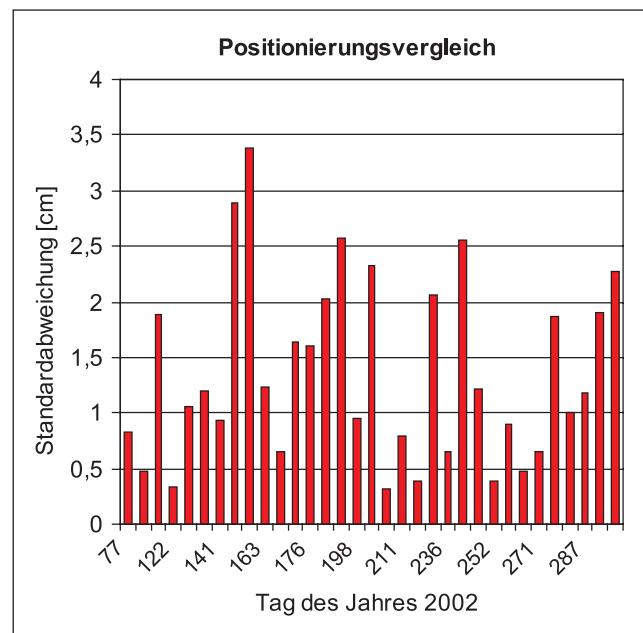
An den Tagen 147, 157 sowie 208 lieferte die L1-basierte Positionslösung von TropAC keine ausreichend hohe

**Tab. 1: Vergleich der GPS-Troposphäreschätzungen mit Hilfe der Referenzstations-Empfänger CIU1 und CIU2. (NWM: numerisches Wettermodell; Rad.: Radiometer)**

Größe	Vergleich	Systematik	Std. Abw.
ZTD	CIU1 $\Leftrightarrow$ CIU2	0,2 mm	5,5 mm
ZTD	CIU1 $\Leftrightarrow$ NWM	5,6 mm	15,6 mm
ZTD	CIU2 $\Leftrightarrow$ NWM	5,3 mm	15,3 mm
ZWD	CIU1 $\Leftrightarrow$ Rad.	2,2 mm	9,1 mm
ZWD	CIU2 $\Leftrightarrow$ Rad.	3,1 mm	9,6 mm

Genauigkeit für eine erfolgreiche Mehrdeutigkeitsfixierung und musste durch die Wide-Lane-Lösung (virtuelle Wellenlänge von 86 cm an Stelle von nur 19 cm auf L1) ersetzt werden. Für die Tage 208 und 281 waren manuelle Eingriffe nötig, da die automatisch generierte Lösung nicht von zufriedenstellender Qualität war (L1-Lösung erfolgreich, aber Verdichtung der genutzten Datenrate notwendig).

Abb. 4 veranschaulicht die Höhengenauigkeit. Dargestellt wird die aus den Höhendifferenzen zwischen GeoGenius und TropAC berechnete Standardabweichung in einem Zeitfenster von insgesamt 60 Sekunden um den Zeitpunkt des Satellitenüberfluges. Bei 8 Überflügen (24%) liegt die Standardabweichung bei über 2 cm, überschreitet aber die Marke von 3,5 cm nicht. In 15 von 33 Fällen – was gut 45 % der Experimente ausmacht – liegt die Übereinstimmung bei 1 cm oder besser. Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den beiden Lösungen besteht. In 91 % der Experimente war eine erfolgreiche Lösung unter alleiniger Verwendung der Einzelfrequenzdaten möglich.



### 3.2.2 Lange Basislinien

Die Notwendigkeit der Installation einer in möglichst geringer Entfernung zu den Bojen gelegenen Referenzstation führt zu erhöhten Kosten. Könnten vorhandene Referenzstationen, z.B. aus dem IGS- oder EUREF-Netzwerk – trotz größerer Entfernung – erfolgreich zur Bojenpositionierung genutzt werden, würde sich eine deutliche finanzielle Entlastung ergeben. Gleichzeitig (oder alternativ) könnten die Bojen in größerer Küstenentfernung bisher nicht genutzte Hochseebereiche erschließen.

Für die im Rahmen dieser Untersuchungen ausgewählten Experimente über lange Basislinien wurden die IGS-Referenzstationen Madrid (MADR, Spanien, 680 km entfernt) und Matera (MATE, Italien, 1300 km entfernt) genutzt, die GPS-Daten mit einer geeigneten zeitlichen Auflösung von 1 Hz bereitstellen. Die troposphärischen Korrekturen für die Referenzstationen entstammen kombinierten IGS- oder EUREF-Produkten. Für die Bojen kommt das GDAS-Wettermodell unter Nutzung der TROPEX-Datenrepräsentation zum Einsatz (Schüler 2000 und 2001, S. 209 ff). Die ionosphärischen Fehler werden über eine Code-Carrier-Kombination ermittelt und verbleibende Restfehler durch Verwendung der Linearkombinationen L43 bzw. L54 auf 7,0 % bzw. 5,5 % reduziert, wobei diese virtuellen Beobachtungen eine vergleichsweise geringe Wellenlänge von 10 bis 11 cm aufweisen, was die Mehrdeutigkeitsfixierung etwas erschwert.

Die in Tab. 2 zusammengetragenen Ergebnisse für acht willkürlich ausgewählte Tage zeigen, dass zwei Experimente mit Standardabweichungen von 1,1 bzw. 1,5 cm gute Ergebnisse aufweisen. Am Tag 182 liegt dieser Wert mit knapp 5 cm in einem noch akzeptablen Bereich, während es am Tag 87 zur Fehlfixierung vereinzelter Mehrdeutigkeiten kommt und mit einer Genauigkeit von 9 cm bereits die Genauigkeitsforderungen überschritten werden. An 4 Tagen kann keine erfolgreiche Fixierung vorgenommen werden, so dass mit den als Fließkomma-Zahlen bestimmten Mehrdeutigkeiten positioniert werden muss, was zu einer für diesen Zweck ungenügenden Standardabweichung von rund 20 cm führt.

Insgesamt zeigt sich die Überlegenheit der Positionsbestimmung über kurze Basislinien, wenngleich die hier veröffentlichten Ergebnisse über sehr lange Basislinien

**Tab. 2:** Ergebnisse der kinematischen Bojenpositionierung über die weit entfernten Referenzstationen Madrid (MADR) und Matera (MATE).

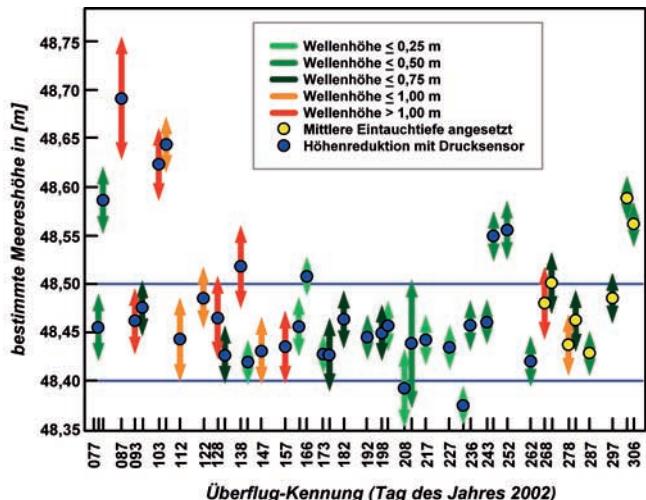
Tag	Kombination	Fixierung	Std. Abw.
087	L43	Ja	9,1 cm
122	L43	Ja	1,5 cm
147	L54	Nein	20,7 cm
157	L54	Nein	20,0 cm
182	L54	Ja	5,0 cm
192	L43	Ja	1,1 cm
217	L54	Nein	18,9 cm
227	L54	Nein	25,2 cm

zu weiteren Untersuchungen motivieren. Insbesondere die Netzwerkkonfiguration könnte durch Einbindung weiterer Referenzstationen optimiert werden, was hier wegen fehlender 1 Hz-Daten unterblieb.

### 3.2.3 Reduzierte Höhen

Die Bestimmung der GPS-Antennenposition allein reicht für die Aufgaben der Radaraltimeter-Kalibrierung noch nicht aus. Vielmehr soll aus dieser Antennenhöhe auf die momentane Höhe des Meeresspiegels geschlossen werden. Zur Lösung dieses Problems kommen Neigungssensor und Druckmesser (Bestimmung der Bojen-Eintauchtiefe) zum Einsatz.

Weiterhin ergibt sich ein Übertragungsproblem: Während ENVISAT die Meereshöhe quasi als Flächenmittelwert über den effektiv genutzten Fußpunkt durchmesser bestimmt, repräsentieren die Bojenwerte letztlich Punkt-messungen innerhalb dieses Fußpunktes. Um beide Werte miteinander vergleichbar zu machen, werden die Bojennmessungen durch zeitliche Mittelwertbildung zusammengefasst. Das Zeitfenster zur Mittelbildung wird dabei unter Annahme einer ähnlichen Wellenbewegung im gesamten Fußpunktbereich so gewählt, dass es jene Zeitspanne übersteicht, die eine Welle zur Durchquerung der Fußpunktfläche benötigen würde.



**Abb. 5:** Gegenüberstellung der einzelnen Meereshöhenbestimmungen für Forschungsboje FTB2. Die Pfeillängen zeigen die über Fehlerfortpflanzung ermittelten Standardabweichungen an. Die Höhen wurden um den Einfluss von Gezeiten und Änderungen des Luftdrucks bereinigt.

Abb. 5 stellt die Meereshöhenbestimmungen gegenüber. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Einzelwerte zu gewährleisten, wurden diese vom Gezeiteneffekt sowie vom Einfluss der Luftdruck-Änderungen auf die Meereshöhe (»inverser Barometer-Effekt«) befreit. Gut 75 % der Ergebnisse liegen innerhalb des blau eingezeichneten 5 cm-Bandes um die Höhe von 48,45 m (oder befinden sich nur marginal außerhalb). Drei deutliche Ausreißer sind innerhalb des ersten Viertels des Messzeitraumes zu sehen, die im Zusammenhang mit hohen Wellenhöhen

stehen (rote/orange Pfeile). Die Fehlerfortpflanzung hat in diesen Fällen zu einer zu optimistischen Genauigkeitsabschätzung geführt, was teilweise auf die nur unvollständig bekannten Fehlerparameter des Neigungsmessers, insbesondere auf dynamische Terme, zurückzuführen ist. Der Median<sup>1</sup> findet sich bei 48,456 m mit einem IQR<sup>2</sup> von 5,1 cm. Unter Ausschluss der drei stärksten Ausreißer beträgt der arithmetische Mittelwert 48,466 m mit einer Standardabweichung von 5,0 cm – ein unter Berücksichtigung der verschiedenen Fehlerquellen zufrieden stellendes, aber im Hinblick auf zukünftige Kampagnen dieser Art durchaus noch steigerungsfähiges Resultat.

#### 4 Wertung und Ausblick

Die im Rahmen dieses Projektes ausgeführten Arbeiten blieben nicht frei von Rückschlägen. Bedingt durch das unerwartet sehr stürmische Frühjahr des Jahres 2002 zeigte sich beispielsweise, dass die Bojen des Typs »Solarleuchttonne« nicht für diesen Einsatzzweck bzw. dieses Einsatzgebiet geeignet sind. Glücklicher Weise erwiesen sich die »Großen Fastonnen« als robuste Sensorplattformen, die zum Erfolg des Projektes entscheidend beitrugen.

Die verwendeten kapazitiven Neigungsmesser können als ein wesentlicher Schwachpunkt des Systems betrachtet werden, da sie anfällig gegenüber den durch Wellenbewegungen hervorgerufenen dynamischen Einflüssen sind. Diese Tatsache gab zur Befürchtung Anlass, dass auf Grund der überdurchschnittlich schlechten Wetterverhältnisse im Jahr 2002 vor Menorca mit einem deutlichen Genauigkeitsverlust zu rechnen wäre. Abb. 5 zeigt diese Tendenzen glücklicherweise nicht in der erwarteten Deutlichkeit auf, was zu einem guten Teil mit der internen Tiefpassfilterung der Neigungsmesser begründet werden kann, die im Mittel auch bei rauerer See letztlich doch noch zu akzeptablen Werten führte. Alternativen beständen im Einsatz von Kreiselsystemen. Gegenwärtig wird weiterhin untersucht, ob ein Mehrantennen-GPS-System Verbesserung verspricht, das auch die Lagebestimmung der Boje zulassen würde.

Trotz der in diesem Abschnitt geübten Kritik, die das bei größeren Bojen nicht unkritische Problem der Höhenreduktion adressieren, kann grundsätzlich festgestellt werden, dass sich das im Rahmen dieses Projektes realisierte Konzept bewährt hat. Gleichwohl ergibt sich für zukünftige Projekte dieser Art eine Notwendigkeit, die

Genauigkeit der GPS-Bojen weiter zu steigern, da auch bzgl. der Messgenauigkeit der Satelliten-Altimeter eine Steigerungstendenz festgestellt werden kann.

#### Danksagung

Dem Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven (Herr Mika) wird für die Bereitstellung und Modifikation der Tonnen sowie die geleistete Beratung während des Projektes gedankt. Die GPS-Daten für die Experimente über lange Basislinien entstammen dem IGS-LEO-Netzwerk, die statischen Prozessierungsaufgaben wurden maßgeblich unter Nutzung von Daten des EUREF-Netzwerkes realisiert. Die Radiometerdaten an der Referenzstation bei Ciudella wurden von Dr. Martellucci (ESTEC) aufgenommen und zur Verfügung gestellt. Die Gezeitenkorrektur entstammt den im Rahmen dieses Projektes von der TU Dresden (Dr. Liebsch, Herr Richter) in Bojennähe auf dem Meeresboden durchgeföhrten Druckpegelmessungen.

#### Literatur

- Bock, Y., Nikolaidis, R. M., de Jonge, P. J., Bevis, M.: Instantaneous Geodetic Positioning at Medium Distances with the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105 (B12), S. 28.223–28.253, 10. Dezember 2000.
- Born, G. H., Christensen, E. J. u. a.: Calibration of TOPEX altimeter using a GPS buoy. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99 (C12), S. 24.517–24.526, 1994.
- Christensen, E. J. u. a.: Calibration of TOPEX/POSEIDON at Platform Harvest, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99 (C12), S. 24.465–24.485, 1994.
- Denker, H., Torge W.: The European Gravimetric Quasigeoid EGG97. *International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 119, *Geodesy on the Move*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, S. 249–254, 1998.
- Duan, J., Bevis, M., Fang, P., Bock, Y., Chiswell, St., Businger St. u. a.: GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 35, S. 830–838, June 1996
- Francis, C. R. u. a.: The calibration of ERS-1 radar-altimeter – The Venice calibration campaign. *European Space Agency Rep. ER-RP-ESA-RA-0257*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1993.
- Francis, C. R., Roca, M.: RA-2 In-Orbit Absolute Calibration Plan: Range. *European Space Agency/ESTEC*, Noordwijk, The Netherlands, 2000.
- Mitchum, G. T.: Comparison of TOPEX sea surface heights and tide gauge sea levels, *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), S. 24.541–24.553, 1994.
- Schüler, T.: On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation. Dissertation, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Nr. 73, 2001.
- Schüler, T., Hein, G. W., Eissfeller, B.: Improved Tropospheric Delay Modeling Using an Integrated Approach of Numerical Weather Models and GPS. *Proceedings of ION GPS 2000*, The Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, USA, 19. bis 22. September 2000.

1 Der Median entspricht dem mittigen Wert (50 %-Grenze) der sortierten Werteliste. Er ist gegenüber Ausreißern weitgehend unempfindlich und wird daher dem Mittelwert vorgezogen.

2 Unter dem Interquartile Range (IQR) wird ein Maß für die Streuung verstanden, das sich aus der Differenz zwischen der 75 %- und 25 %-Grenze ergibt; siehe auch Bock (2000).

#### Anschrift des Autors

Dr.-Ing. Torben Schüler  
 Institut für Erdmessung und Navigation  
 Universität der Bundeswehr München  
 D-85577 Neubiberg  
 torben.schueler@unibw-muenchen.de