

Untersuchungen zu den globalen Positionierungsdiensten von Fugro OmniSTAR

Teil I: Grundlagen und Überblick*

Hansbert Heister, Otto Heunecke, Thomas Kerraschk und Andreas Pflugmacher

Zusammenfassung

Fugro OmniSTAR ist einer der weltweit führenden Dienstleister bei satellitengestützten Positionierungen, der mit seinem Portfolio unterschiedliche Nutzergruppen anspricht. Im ersten Teil des Aufsatzes werden die Funktionsprinzipien der einzelnen zur Verfügung stehenden Dienste VBS, HP, XP und HP⁺ beschrieben. Über die praktischen Erfahrungen im Umgang mit den OmniSTAR-Positionierungsdiensten sowie über Untersuchungen zur Genauigkeit wird später im zweiten Teil dieses Beitrages berichtet.

Summary

Fugro OmniSTAR is one of the worldwide leading providers for satellite based positioning, who addresses varied user communities with his portfolio. In the first part of this article the functional principles of the different available services VBS, HP, XP and HP⁺ are described. The second part of this paper will report on some practical experiences and accuracy investigations obtained with the OmniSTAR positioning services.

1 Einführung

Die einfache autonome Positionsbestimmung mittels GNSS ist auf Genauigkeiten im Meterbereich beschränkt. Eine satellitengestützte Positionsbestimmung wird für viele Anwendungen erst dann sinnvoll, wenn zusätzliche Korrekturinformationen zur Verfügung stehen, um in Echtzeit Genauigkeitssteigerungen bis in den dm- oder cm-Bereich zu erreichen. Korrekturdienste zur satellitengestützten Positionierung sind bereits seit Mitte der 90er-Jahre bekannt. Die verschiedenen Angebote unterscheiden sich in folgenden Aspekten:

- Geographische Abdeckung (lokal, regional, global),
- verwendete Messgrößen des Positionierungsverfahrens (Codemessungen, Phasenmessungen),
- Art der Korrekturinformationen (differenzielle Korrekturdaten oder abgeleitete Informationen wie verbesserte Uhr- und Bahndaten, Modellierung des aktuellen Troposphärenzustandes etc.),
- zeitliche Verfügbarkeit (Echtzeit, Postprocessing),
- Träger des Dienstes (kommerziell, öffentlich),
- Kosten (kostenpflichtig, kostenfrei),
- Übertragung der Korrekturdaten (Funk, GSM, Internet, Kommunikationssatellit),
- unterstützte Satellitensysteme (GPS, GLONASS, zukünftig GALILEO etc.).

Bei Fugro OmniSTAR handelt es sich um einen kommerziellen Anbieter, der weltweit Korrekturinformationen für Echtzeitanwendungen bereitstellt. Fugro OmniSTAR bietet verschiedene Dienste an, die die Genauigkeitsbereiche m bis dm abdecken. Die Art der verwendeten Messgrößen (Code/Phase) ebenso wie die Art der Korrekturinformationen unterscheidet die jeweiligen Dienste, die Übertragung der Korrekturinformationen erfolgt stets mittels geostationärer Kommunikationssatelliten. Bislang beschränkte sich OmniSTAR im Wesentlichen auf die Nutzung des GPS. Die Einbeziehung von GLONASS und später auch GALILEO ist geplant und in Teilen bereits erfolgt. Anfang 2009 wird die Unterstützung von GLONASS durch OmniSTAR erheblich ausgeweitet (Fugro 2008). Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich jedoch nur auf die Verwendung des GPS.

Für eine verbesserte satellitengestützte Positionsbestimmung sind folgende Verfahren möglich:

- Differenzielle Positionsbestimmung (relativ zu Referenzstationen),
- präzise absolute Positionsbestimmung (Nutzung aktueller Zusatzinformationen, u. a. präzise Ephemeriden, Satellitenuhrkorrekturen).

Fugro OmniSTAR bietet Positionierungsdienste an, die beide genannten Methoden verwenden. Das Prinzip der Positionsbestimmung mit OmniSTAR ist in Abb. 1 skizziert. Fugro betreibt ein eigenes Referenzstationsnetz, auf dessen Stationen (1) die Daten aufgezeichnet werden, die für den Betrieb der differenziellen Positionierungsdienste notwendig sind. Zudem greift OmniSTAR bei seinem Ab-

* Der vorliegende Aufsatz ist in zwei Teile gegliedert. Teil I gibt einen allgemeinen Überblick über Fugro OmniSTAR. Es werden die wichtigsten Grundlagen erläutert, die der potentielle Nutzer für einen sachgemäßen Umgang mit den OmniSTAR-Positionierungsdiensten wissen muss.

Teil II widmet sich den gewonnenen Ergebnissen einer Studie, mit der das Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München vom Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr und vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Geschäftsfeld Navigation, beauftragt wurde.

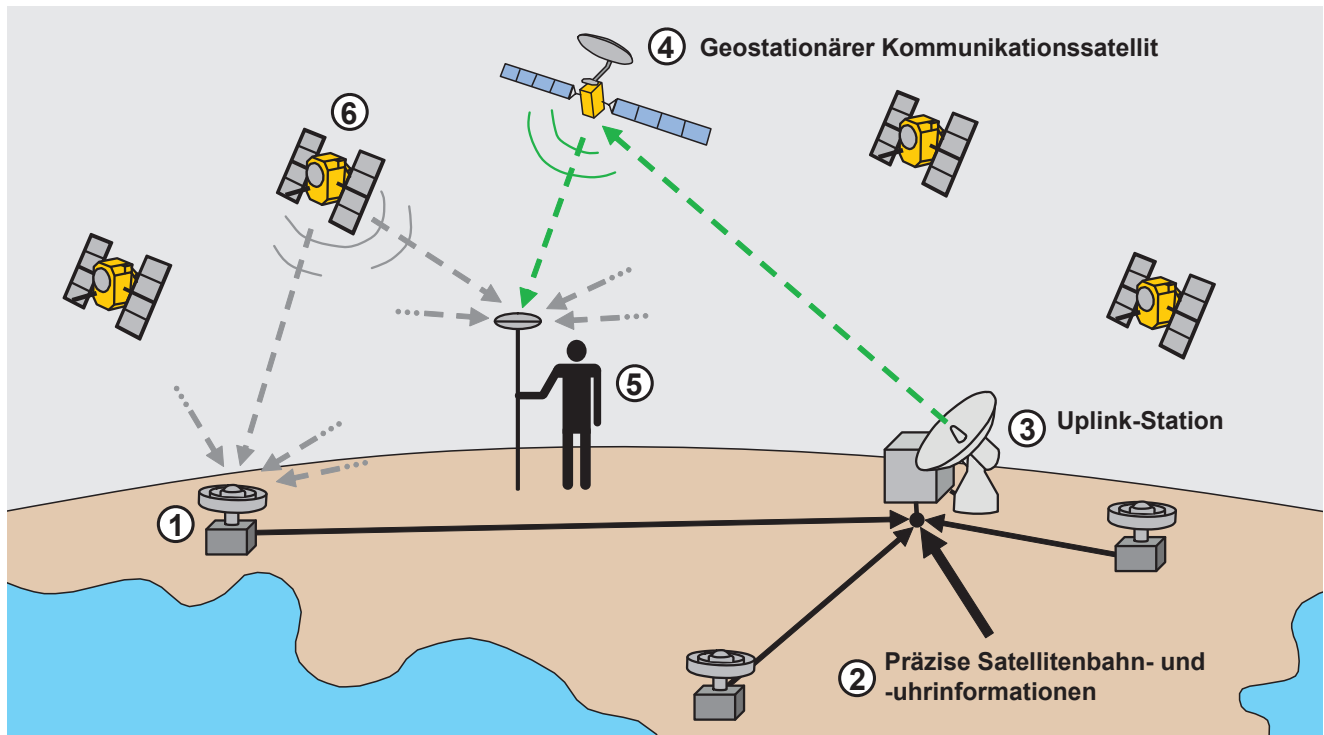


Abb. 1: Prinzip der Positionsbestimmung mit OmniSTAR

solutpositionierungsdienst auf präzise Satellitenbahn- und -uhrinformationen (2) zurück. Die aus den Daten generierten Korrekturinformationen werden von einer Uplink-Bodenstation (3) an einen geostationären Kommunikationssatelliten (4) übermittelt und von diesem im L-Band ausgestrahlt. Es handelt sich somit um ein Satellite Based Augmentation System (SBAS). Der Nutzer (5) muss über ein OmniSTAR-fähiges GNSS-System verfügen und empfängt über dessen Antenne sowohl die Signale der GPS-Satelliten (6) als auch das Korrekturdatensignal vom geostationären Satelliten (4), mit denen der GPS-Empfänger unmittelbar die verbesserten Positionen ermittelt. Die Nutzung von OmniSTAR ist kostenpflichtig. Der Nutzer benötigt eine gültige Lizenz, um den Empfänger freizuschalten.

Die Freischaltung des Empfängers erfolgt mittels eines Signals, das vom Kommunikationssatelliten übertragen wird. Der Termin für die Übermittlung des Aktivierungssignals kann mit der OmniSTAR-Hotline oder per E-Mail vereinbart werden. Das Aktivierungssignal wird wie die Korrekturdaten über die OmniSTAR-fähige GNSS-Antenne empfangen. Die Information zum Freischaltungszustand bleibt im Empfänger gespeichert. Während der Messungen werden laufend die Voraussetzungen für die Gültigkeit der Lizenz überprüft.

2 Die OmniSTAR-Dienste

Während des Zeitraumes der durchgeführten Untersuchungen standen für unterschiedliche Genauigkeitsansprüche folgende OmniSTAR-Dienste zur Verfügung:

- OmniSTAR VBS (Virtual Base Station),
- OmniSTAR HP (High Performance),
- OmniSTAR XP (Extended Performance) und
- OmniSTAR HP+ (Kombination von HP und XP).

Im Laufe des Jahres 2009 ändert sich das Spektrum der angebotenen Dienste leicht. Dann wird neben weiteren der Dienst »OmniSTAR G2« angeboten, der sowohl GPS- als auch GLONASS-Signale nutzt (Fugro 2008).

OmniSTAR VBS basiert auf der Auswertung von Einfrequenz-Codebeobachtungen. Bei der Positionsbestimmung mit dem VBS-Dienst handelt es sich um eine *globale* vernetzte differenzielle Lösung. OmniSTAR greift dabei auf das Fugro-Referenzstationsnetz zurück (Abb. 2), das weltweit zur Zeit 110 Stationen umfasst (Dezember 2008). Die Beobachtungsdaten der nächstgelegenen Referenzstationen dienen als Grundlage für die Interpolation von Pseudostreckenkorrekturen einer virtuellen Referenzstation am Ort des Nutzers. OmniSTAR offeriert für diesen Dienst Sub-Meter-Genauigkeit bei bis zu 1000 km Entfernung zu den Referenzstationen.

OmniSTAR HP nutzt L1- und L2-Code- und Trägerphasenbeobachtungen. Es handelt sich auch hierbei um ein vernetztes differenzielles Verfahren, welches auf das Fugro-Referenzstationsnetz zurückgreift. Der HP-Dienst weist ein stark ausgeprägtes zeitabhängiges Einlaufverhalten auf. Die Positionsbestimmung ist als Prozess zu sehen, in dessen Verlauf sich die Genauigkeit der geschätzten Positionen stetig verbessert. Nach ausreichend langer Wartezeit garantiert OmniSTAR für den HP-Dienst Sub-Dezimeter-Genauigkeit bei Abständen bis zu 1000 km von den Referenzstationen. Der Zeitraum vom Einschalten des

Empfängers bis zum Erreichen des garantierten Genauigkeitsniveaus kann in Abhängigkeit der Satellitenkonfiguration während der Messung stark variieren. Konvergenzphasen bis zu einigen Stunden sind möglich.

Auch *OmniSTAR XP* basiert auf der Auswertung von Zweifrequenz-Code- und Trägerphasenmessungen und offeriert ebenso wie der HP-Dienst nach einer entsprechend langen Einlaufphase Genauigkeiten im Sub-Dezi-

(Visser 2007). In großer Entfernung zum Fugro-Referenzstationsnetz basiert die kombinierte Lösung hauptsächlich auf *OmniSTAR XP*; mit zunehmender Annäherung an die Stationen fließt die HP-Lösung immer stärker mit ein. Der HP⁺-Dienst zeichnet sich gegenüber den voneinander unabhängigen Diensten HP und XP vor allem durch eine höhere Toleranz gegenüber Ausfällen im Referenzstationsnetz bzw. im XP-Korrekturdatenstrom aus.

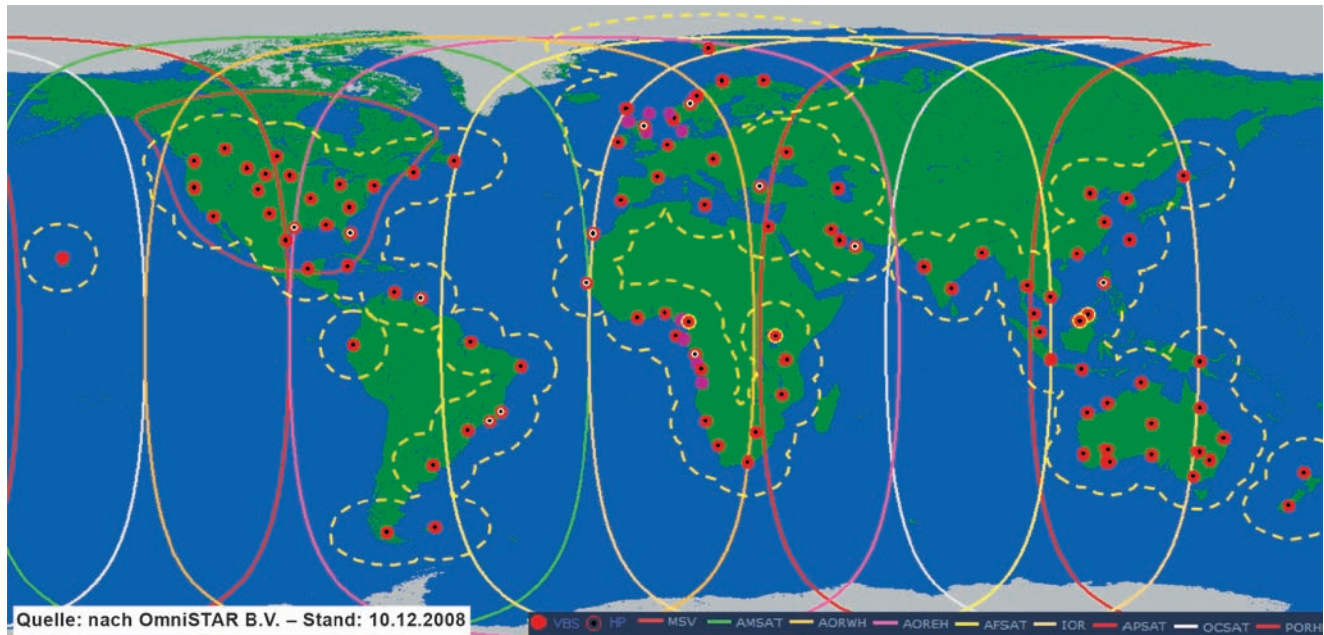


Abb. 2: Fugro-Referenzstationsnetz – Stand: Dezember 2008

meter-Bereich. Im Gegensatz zu *OmniSTAR HP* handelt es sich jedoch nicht um ein differenzielles Verfahren. Daher wird das in Abb. 2 dargestellte Referenzstationsnetz nicht unmittelbar verwendet. *OmniSTAR XP* liegt ein Verfahren der präzisen absoluten Positionsbestimmung zugrunde. Gemäß Visser (2007) werden dabei präzise Satellitenbahn- und -uhrdaten verwendet. *OmniSTAR* bezog diese bislang vom U.S.-amerikanischen Jet Propulsion Laboratory (JPL), zukünftig wird das *OmniSTAR*-Referenzstationsnetz der Generierung der Bahn- und Uhrdaten dienen (Fugro 2008). Das Verfahren der präzisen absoluten Positionsbestimmung mittels GNSS wird auch als *Precise Point Positioning* (PPP; nicht zu verwechseln mit dem *Precise Positioning Service* – PPS – unter Verwendung des militärischen Codes) bezeichnet. Die Tatsache, dass *OmniSTAR XP* und *OmniSTAR HP* ein vergleichbares Konvergenzverhalten zeigen, deutet darauf hin, dass den beiden Diensten ähnliche Funktionsprinzipien zugrunde liegen. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass bei der Nutzung des XP-Dienstes Absolutmessungen in den Konvergenzprozess einfließen, während bei *OmniSTAR HP* Relativmessungen zu den Referenzstationen Verwendung finden.

Bei *OmniSTAR HP⁺* erhält der Nutzer Positionen, die aus HP- und XP-Positionen kombiniert sind. Das Gewicht, mit dem die HP- bzw. XP-Lösung eingehen, hängt von der Position gegenüber dem Referenzstationsnetz ab

Die seitens *OmniSTAR* veröffentlichten Angaben zur Genauigkeit der verschiedenen Dienste sind unscharf und teilweise widersprüchlich. Aus vergleichender Sichtung von Informationsblättern (*OmniSTAR* 2006, etc.), Handbüchern, Fachartikeln, Vorträgen sowie der persönlichen Kontaktaufnahme zu Fugro *OmniSTAR* resultiert die in Tab. 1 wiedergegebene Übersicht, die für statische und kinematische Messungen (Navigation von Landfahrzeugen) gleichermaßen gilt. Das Vertrauensniveau der Angaben beträgt 95%.

Voraussetzung für die Gültigkeit der Genauigkeitsangaben in Tab. 1 ist im Falle der differenziellen Dienste VBS und HP, dass sich der Nutzer innerhalb des Referenzstationsnetzes oder bis zu höchstens 1000 km außerhalb davon befindet. Somit ist eine weltweit flächendeckende Verfügbarkeit von *OmniSTAR VBS* und *OmniSTAR HP* mit dem derzeitigen Referenzstationsnetz nicht vollständig gegeben. Da der XP-Dienst vom Fugro-Referenzstationsnetz unabhängig ist, existieren für *OmniSTAR XP* keine derartigen Einschränkungen. Aufgrund des Konvergenzverhaltens der Dienste HP, XP und HP⁺ gelten die Genauigkeitsspezifikationen dieser Dienste erst nach Vollendung der Einlaufphase. Sie sind vor allem in Anbetracht der Tatsache bemerkenswert, dass Fugro über ein sehr weitmaschiges Referenzstationsnetz (s. Abb. 2) verfügt, das teilweise Abstände von über 1000 km bedingt. Zum Vergleich sei beispielhaft auf das SAPOS-Netzwerk

Tab. 1: Spezifizierte Messunsicherheiten der OmniSTAR-Dienste (Vertrauensniveau 95 %)

Dienst	Spezifizierte 95 %-Messunsicherheit [cm]		Bedingungen für die Gültigkeit
	Lage	Höhe	
VBS	100	k. A.	■ Innerhalb des Referenzstationsnetzes oder außerhalb des Netzes bis 1000 km Entfernung zur nächsten Station ■ Einschränkungen im äquatorialen Bereich
XP	10	15	■ Nach vollendeter Einlaufphase
HP	10	15	■ Nach vollendeter Einlaufphase ■ Innerhalb des Referenzstationsnetzes oder außerhalb des Netzes bis 1000 km Entfernung zur nächsten Station
HP+	10	15	■ Nach vollendeter Einlaufphase

geschätzte MRSE als auch die Abweichungen gegenüber dem Soll innerhalb der dargestellten Zeitspanne von ca. 1,5 Stunden stark konvergieren. Die geschätzten HP-Positionen variieren zu Beginn um fast zwei Meter. Für eine satellitengestützte Positionierung in Echtzeit ist dieses Konvergenzverhalten untypisch. Während

der Vermessungsverwaltungen der deutschen Bundesländer verwiesen; die Maschenweite liegt hier bei etwa 50 km.

Durch das Prinzip der Korrekturdatenübertragung mittels geostationärer Kommunikationssatelliten ist die weltweite Verfügbarkeit aller OmniSTAR-Dienste geringfügig eingeschränkt. In Abb. 2 sind die Footprints der von OmniSTAR genutzten Kommunikationssatelliten eingetragen, die über dem Äquator verteilt sind. Dadurch ist praktisch bis auf Zonen höherer geographischer Breite eine weltweite Abdeckung der OmniSTAR-Korrekturdaten gewährleistet. Diesbezüglich ist anzumerken, dass die Signale an den Rändern der in Abb. 2 eingezeichneten Footprints unter einem Elevationswinkel von 0° einfallen. Die Grenze der Empfangbarkeit der Signale ist jedoch in Abhängigkeit der benutzten GNSS-Antenne in der Praxis etwas früher erreicht.

3 Besonderheiten der Dienste HP, XP und HP+

3.1 Konvergenzverhalten

Vom Start einer Messung bis zu dem Zeitpunkt, an dem das volle Genauigkeitspotenzial erreicht ist, fallen bei vollständiger Initialisierung Wartezeiten an, deren Dauer in Abhängigkeit von der Satellitenkonfiguration variiert. Abb. 3 veranschaulicht das typische Konvergenzverhalten anhand einer exemplarischen Messung. Dargestellt sind die Abweichungen von HP-Positionen gegenüber dem Soll sowie ein dreidimensionales Genauigkeitsmaß, welches aus den vom Empfänger geschätzten Genauigkeitsangaben σ_{Nord} , σ_{Ost} und $\sigma_{Höhe}$ berechnet wurde – der Mean Radial Spherical Error (MRSE):

$$MRSE = \sqrt{\sigma_{Nord}^2 + \sigma_{Ost}^2 + \sigma_{Höhe}^2} \quad (1)$$

Das Vertrauensniveau des MRSE beträgt etwa 61%. Die Abb. 3 lässt erkennen, dass sowohl der vom Empfänger

rend der ersten neun Minuten der Messung wurden vom Empfänger keine gültigen Positionen ausgegeben. Bei der hier ausgewählten Messung hat der Empfänger insbesondere in der Einlaufphase die Genauigkeit der Positionsbestimmung deutlich zu optimistisch geschätzt – weit mehr als 61 % der Abweichungen zum Soll sind größer als der jeweils zugehörige, aus Geräteangaben ermittelte MRSE.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die den OmniSTAR-Diensten zugrunde liegenden Techniken ständig weiterentwickelt werden. Bei neueren Firmwareversionen werden beispielsweise zwecks Initialisierung VBS-Positionen in den HP-Prozess eingespeist, sofern der Abstand zum Referenzstationsnetz nicht zu groß ist. So startet der Konvergenzprozess auf einem höheren Genauigkeitsniveau und fällt etwas kürzer aus. Auch die Einbeziehung von GLONASS sowie Erweiterungen des Referenzstationsnetzes dürften positive Auswirkungen auf das Messverhalten haben.

Das genaue Funktionsprinzip, die Algorithmik der OmniSTAR-Dienste, ist Firmengeheimnis der FUGRO-Gruppe und daher für die Allgemeinheit nicht offengelegt; in Visser (2006) sowie Ørpen, Melgard (2005) werden oberflächliche Erklärungen zum Funktionsprinzip und zum Konvergenzverhalten gegeben.

3.2 Verfahren der Initialisierung

Um das hohe Genauigkeitsniveau zu erlangen, das OmniSTAR für seine globalen Dezimeter-Dienste garantiert, stehen drei Formen der Initialisierung zur Verfügung:

- Statische Initialisierung,
- dynamische Initialisierung und
- Kick-Start-Initialisierung.

Voraussetzung für die *statische Initialisierung* ist, dass sich die Antenne in ruhendem Zustand befindet. Bei entsprechend langer Wartezeit wird aber der vollständige Konvergenzprozess durchlaufen (s. Abb. 3). Visser (2006,

2007) gibt für diese Einlaufphase eine durchschnittliche Dauer von ca. zehn Minuten an. Bei Betrachtung von Abb. 3 kommen jedoch Zweifel an dieser Aussage auf. Während der dargestellten Messung bewegen sich die Abweichungen in den Positionen gegenüber dem Soll erst nach ungefähr 1 h 15 min auf dm-Niveau.

Bei der *dynamischen Initialisierung* befindet sich die Antenne in bewegtem Zustand, wodurch sich die Anzahl

Unabhängig von der Art der Initialisierung kann die Position der Antenne während der Initialisierung jederzeit verändert werden, ohne dass der Konvergenzprozess dadurch zerstört wird und von neuem gestartet werden muss. Sobald die Bewegung beginnt, erkennt das Gerät diese automatisch und ändert den Initialisierungsmodus auf »dynamisch«. Das erreichte Genauigkeitsniveau bleibt erhalten, der Konvergenzprozess wird mit verminderter

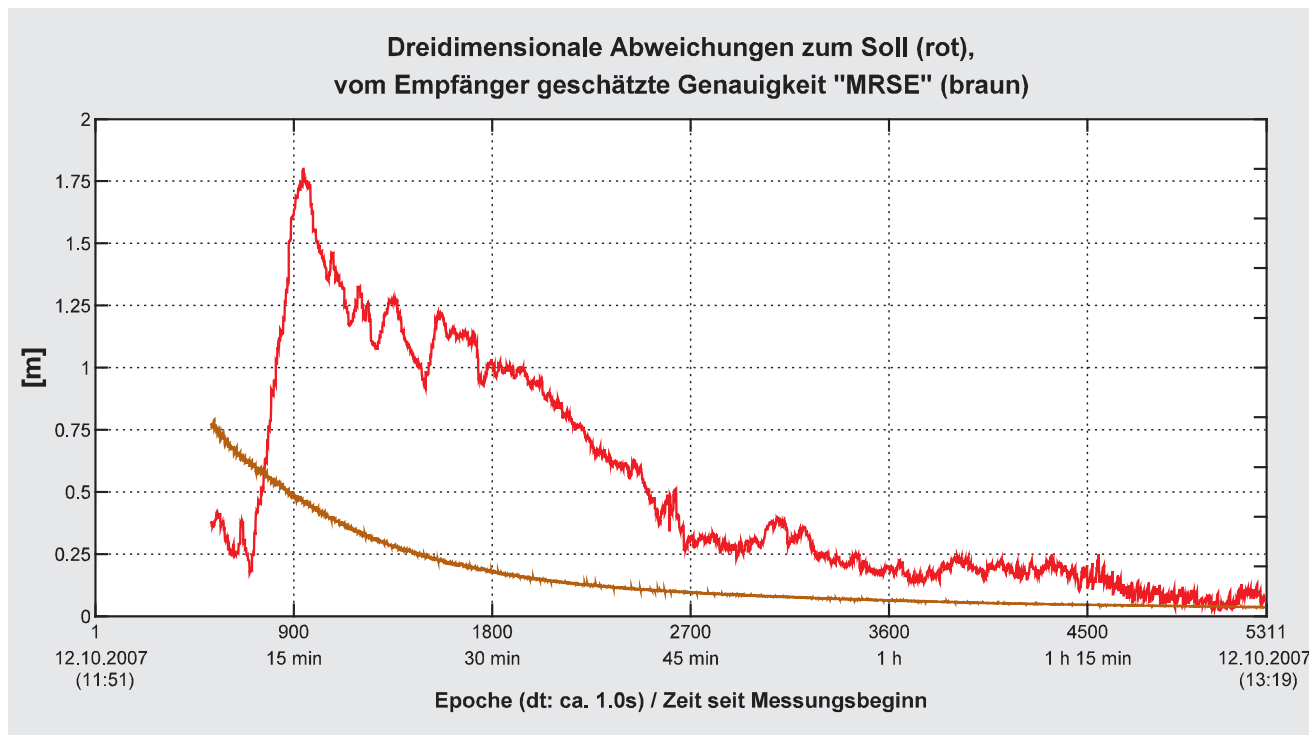


Abb. 3: Konvergenzverhalten des Dienstes OmniSTAR HP bei einer exemplarischen Messung (Gerätetyp: OmniSTAR 8300 HP, Seriennummer: 777246)

der zu bestimmenden Koordinaten während des Konvergenzprozesses erhöht. Daher beansprucht die dynamische Initialisierung erheblich mehr Zeit als die statische. Für diesen Fall gibt Visser (2006) die durchschnittliche Dauer der dynamischen Initialisierung mit ca. 23 Minuten an. Diese Zeitangabe ist ebenso kritisch zu sehen, wie die der statischen Initialisierung.

Die *Kick-Start-Initialisierung* ist ein verkürztes Initialisierungsverfahren, bei dem die Antenne auf einem Punkt (Seedpoint) aufgestellt wird, für den bereits genaue Koordinaten bekannt sind bzw. vorher bestimmt wurden. Auf einem solchen Seedpoint werden dem Empfänger die Koordinaten sowie die zugehörigen Standardabweichungen übergeben. Der Konvergenzprozess wird dann ausgehend vom Genauigkeitsniveau der eingegebenen Koordinaten fortgesetzt. So kann innerhalb weniger Minuten wieder die höchstmögliche Koordinaten-Genauigkeit erreicht werden. Im Falle einer falschen Koordinateneingabe konvergiert der Prozess trotzdem langsam auf den korrekten Wert (Visser 2006); die durchschnittliche Dauer der Kick-Start-Initialisierung wird mit etwa einer halben Minute angegeben.

Geschwindigkeit als dynamische Initialisierung fortgesetzt. So können die Koordinaten des nächsten Punktes mit derselben hohen Genauigkeit gemessen werden, wie vor dem Beginn der Bewegung der Antenne.

3.3 Störungen im Messprozess

Wie vorangehend beschrieben, ist für HP/XP/HP⁺-Prozesse charakteristisch, dass sich die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit zunehmender Dauer des Konvergenzvorganges stetig verbessert. Beim Auftreten von Störungen gilt diese Aussage jedoch nicht. Störungen sind in der Regel auf eine der beiden folgenden Ursachen zurückzuführen:

- Unzureichende Anzahl an verfügbaren GPS-Beobachtungen,
- Unterbrechung des Korrekturdatenempfangs.

Eine unzureichende Anzahl beobachtbarer GPS-Signale wird maßgeblich durch Abschattungen und die daraus folgende schlechte Satellitensichtbarkeit beim Empfänger verursacht. Zusätzlich ist bei der differenziellen Posi-

tionsbestimmung, d. h. dem HP-Dienst, zu bedenken, dass die Beobachtungen am Rover und an den Referenzstationen jeweils gepaart vorliegen müssen. Nur für GPS-Signale, die sowohl am Rover als auch an den betreffenden Referenzstationen simultan beobachtet werden, können Korrekturwerte berechnet werden. Die Verfügbarkeit einer ausreichenden Anzahl an GPS-Beobachtungen hängt somit bei differenziellen Verfahren auch von der Satellitensichtbarkeit auf den unter Umständen weit entfernten Referenzstationen ab. Da den Diensten HP, XP und HP⁺ die Auswertung von Zweifrequenzmessungen zugrunde liegt, müssen auch die L1- und L2-Messungen jeweils in gepaarter Form bzw. simultan vorhanden sein. Ein gängiger Fall ist jedoch, dass L1-Signale empfangen werden, während die L2-Signale zu schwach sind, z. B. infolge der Abschattung durch Vegetation. Störungen des Konvergenzprozesses aufgrund einer unzureichenden Anzahl an Beobachtungen führen dazu, dass das bereits erlangte Konvergenzniveau mit zunehmender Dauer der Unterbrechung mehr und mehr verloren geht. Bereits Störungen, die weniger als eine Minute andauern, können dazu führen, dass der Konvergenzprozess vollständig von Neuem begonnen werden muss.

Unterbrechungen des Korrekturdatenempfangs werden durch die Abschattung der Quasi-Sichtverbindung zum geostationären Kommunikationssatelliten verursacht. Sie führen dazu, dass sich die Genauigkeit während des Zeitraumes der Störung kontinuierlich verschlechtert. Nach Ende des Korrekturdatenausfalles setzt sich der Prozess auf dem Genauigkeitsniveau fort, das vor der Störung vorlag. Wenn die Unterbrechung des Korrekturdatenempfangs länger als fünf Minuten andauert, wird die HP/XP/HP⁺-Lösung vom Empfänger für ungültig erklärt. In diesem Fall muss eine erneute Initialisierung erfolgen.

Das Verhalten der Empfänger bei Auftreten der beschriebenen Probleme wird im zweiten Teil dieses Artikels anhand von Beispielen demonstriert. Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass Störungen des Konvergenzprozesses aufgrund einer unzureichenden Anzahl von GPS-Beobachtungen in der Praxis bedeutender sind, als Unterbrechungen des Korrekturdatenempfangs. Unterbrechungen des Empfangs einer ausreichenden Anzahl an GPS-Beobachtungen führen innerhalb kürzester Zeit zum Verlust des erreichten Konvergenz- bzw. Genauigkeitsniveaus. Die Messung muss dann unterbrochen und eine Reinitialisierung durchgeführt werden. Probleme mit dem Korrekturdatenempfang hingegen wirken sich ausschließlich auf den Zeitraum der Unterbrechung aus, sofern dieser nicht länger als fünf Minuten dauert.

3.4 Nutzen von Seedpoints

Die Problematik des Auftretens von Störungen während des Messprozesses empfiehlt folgende Vorgehensweise bei der Durchführung von Messungen (s. Abb. 4):

Sofern zu Beginn einer Messung keine ITRS-Koordinaten im Messgebiet vorliegen, beginnt das Messprojekt mit einer statischen Messung (1), um einen Seedpoint zu bestimmen. Nachdem der Prozess hinreichend konvergiert ist, werden die Koordinaten und die geschätzten Standardabweichungen gespeichert. Nun können weitere Punkte mit (mindestens) derselben hohen Genauigkeit gemessen werden (Schritte 2 bis 4). Angenommen, dass

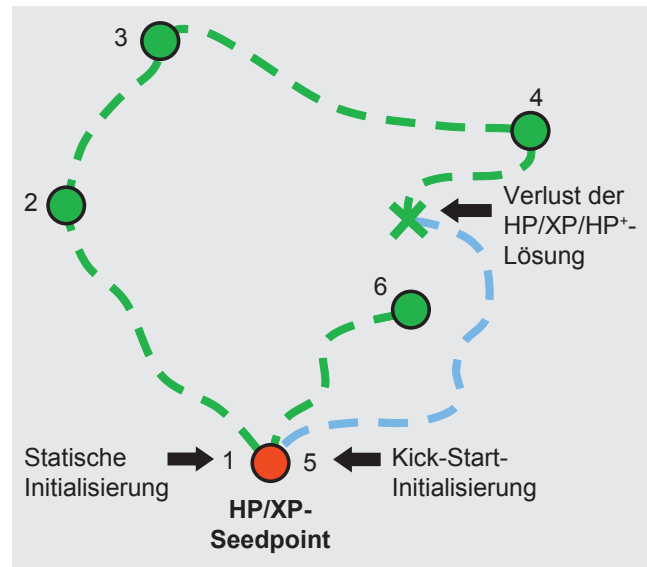


Abb. 4: Vermessungen mit den Diensten HP, XP und HP⁺ mithilfe von Seedpoints

nach Schritt 4 aufgrund von zu starker Abschattung eine Störung auftritt, die zur Folge hat, dass das erreichte Konvergenzniveau verloren geht, wird die Antenne erneut auf dem Seedpoint aufgestellt und eine Kick-Start-Initialisierung durchgeführt (5). Nach der Kick-Start-Initialisierung ist das hohe Konvergenzniveau von Schritt 1 wieder erreicht und weitere Punkte (6) können gemessen werden.

4 Erforderliche Ausrüstung

Die Nutzung von OmniSTAR setzt voraus, dass der Anwender über eine OmniSTAR-fähige Ausrüstung verfügt. Kern sind eine OmniSTAR-fähige GPS-Antenne sowie ein OmniSTAR-fähiger GPS-Empfänger (s. Abb. 5).

OmniSTAR nutzt für die Datenübertragung je nach Kommunikationssatellit unterschiedliche Frequenzen im L-Band, das Frequenzband liegt etwa bei 1543 ± 20 MHz. Deshalb werden Antennen benötigt, die dieses Frequenzband empfangen können. Für die Nutzung des VBS-Dienstes ist zudem der Empfang des GPS-L1-Signals erforderlich – man spricht dann von einer L1/L-Band-Antenne. Da den Diensten HP, XP und HP⁺ die Auswertung von Zweifrequenzbeobachtungen zugrunde liegt, erfordern diese L1/L2/L-Band-Antennen. Hinsichtlich der notwendigen Empfänger ist für den Gebrauch von

OmniSTAR VBS ein VBS-fähiger L1-Code-Empfänger ausreichend. Die Dienste HP, XP und HP⁺ hingegen erfordern Geräte, die L1/L2-Code- und -Trägerphasenmessungen auswerten können. Die Empfänger müssen baulich auf die Nutzung von OmniSTAR ausgelegt sein. Die Beschaffung OmniSTAR-fähiger Hardware kann sowohl direkt über OmniSTAR als auch über andere Anbieter erfolgen. OmniSTAR fertigt keine eigene Hardware an,

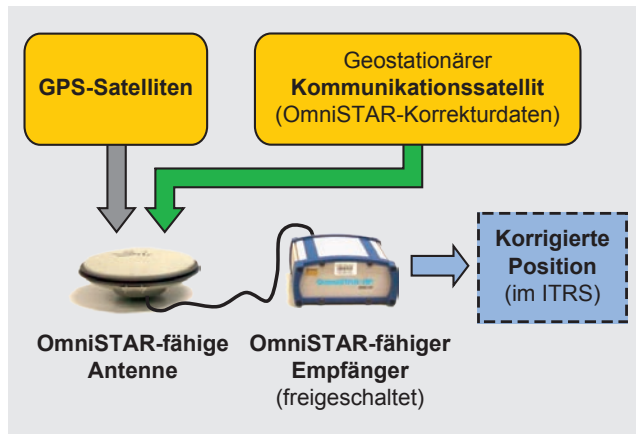


Abb. 5: OmniSTAR-fähige GPS-Ausrüstung

sondern erwirbt diese von Drittherstellern und vertreibt diese in einem typischen blau gehaltenen Design mit OmniSTAR-Label. Im Rahmen der Durchführung der Studie wurden die beiden VBS/HP/XP/HP⁺-fähigen Systeme OmniSTAR 8200 HP und OmniSTAR 8300 HP beschafft. Die gleichen Geräte hätten unter einer anderen Bezeichnung auch direkt von den Originalherstellern Trimble (*AgGPS 332*) bzw. Novatel (*ProPak-Lbplus*) erworben werden können. Neben OmniSTAR sind die Hersteller Hemisphere, Leica, Novatel, Raven, Sokkia, Topcon, Autofarm und Trimble Anbieter OmniSTAR-fähiger Hardware.

Bei der Auswahl von Software für die Durchführung von Vermessungstätigkeiten ist darauf zu achten, inwieweit eine Unterstützung von OmniSTAR-Funktionalitäten gegeben ist. Je geringer diese Unterstützung ausfällt, desto mehr muss auf externe Konfigurationstools des jeweiligen Herstellers zurückgegriffen werden. Das hat Folgen für die Effizienz von Arbeitsabläufen. Von herausragender Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die softwareseitige Unterstützung des Kick-Start-Modus, um bei Störungen der HP/XP/HP⁺-Prozesse verkürzte Initialisierungen vornehmen zu können.

5 Geodätische Aspekte

Beim Einsatz des weltweit operablen Positionierungssystems OmniSTAR ist es unumgänglich, mit geodätischen Definitionen insbesondere zum Bezugssystem vertraut zu sein. Deshalb wird hierzu ein kurzer Überblick gegeben, um die Positionsangaben der verschiedenen OmniSTAR-Dienste korrekt interpretieren bzw. nutzen zu können.

5.1 Bezugssystem, Bezugsrahmen

Ein geodätisches »Bezugssystem« beinhaltet die grundsätzliche Festlegung der Eigenschaften wie der Lagerung des Ursprunges und der Orientierung der Achsen, aber auch weiterer Parameter wie z.B. die geozentrische Gravitationskonstante, ggf. die Halbachsen eines Referenzellipsoides etc. Bei einem »Bezugsrahmen« handelt es sich um die Realisierung eines Bezugssystems anhand der Koordinaten von Punkten, die den Bezugsrahmen definieren. Die Aktualisierung eines Bezugssystems ist gleichbedeutend mit der Bestimmung eines neuen Bezugsrahmens.

5.2 International Terrestrial Reference System (ITRS)

Das ITRS ist das wichtigste internationale geodätische Bezugssystem. Es handelt sich dabei um ein geozentrisches erdfestes System. Die Z-Achse des ITRS fällt mit der mittleren Rotationsachse der Erde zusammen, die X-Achse verläuft rechtwinklig dazu durch den Nullmeridian von Greenwich, die Y-Achse ist rechtwinklig zu den beiden anderen Achsen, sodass ein Rechtssystem aufgespannt wird. Für Definition und Realisierung ist der International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) zuständig. Von Zeit zu Zeit erfolgt die Bestimmung neuer Realisierungen. Grundlage hierfür sind Beobachtungen der gängigen globalen Raum-Beobachtungstechniken VLBI, SLR, LLR, DORIS und GNSS, die im Rahmen einer gemeinsamen Auswertung mit der Systemdefinition zusammengeführt werden. Die Bezugsrahmen des ITRS werden als ITRFs (International Terrestrial Reference Frames) bezeichnet. Die letzten drei Bezugsrahmen des ITRS sowie der jeweilige Zeitraum, in denen diese aktuell waren, sind:

- ITRF97 (08/1999 – 11/2001),
- ITRF2000 (12/2001 – 11/2006) und
- ITRF2005 (11/2006 – laufend).

Die Differenzen in den Koordinaten von Punkten der verschiedenen Realisierungen sind relativ gering und bewegen sich zwischen dem ITRF2000 und dem ITRF2005 im Bereich Millimeter bis Zentimeter.

Die Erdoberfläche befindet sich aufgrund verschiedener Ursachen ständig in Bewegung. Tessenmer (2004) beschreibt eingehend die wichtigsten Ursachen, die in diesem Zusammenhang von Bedeutung sind. Es handelt sich zum einen um die Plattentektonik, die zu langsamen, kontinuierlichen Punktbewegungen führt. Die Relativbewegungen der großen Platten betragen teilweise mehr als 1 dm/a. Koordinaten von Punkten in Mitteleuropa ändern sich gegenüber dem ITRS etwa um 2 cm/a. Zum anderen bewegt sich die Erdoberfläche aufgrund von Erdbeben, Ozean- und Atmosphärenauflasteffekten sowie der Polgezeiten. Besonders die Erdbeben beinhalten starke periodische Anteile und führen im Tagesgang zu Bewegungen, die in der Höhenkomponente etwa einen

halben Meter ausmachen können. Dementsprechend sind die Koordinaten von Positionen auf der Erdoberfläche zeitlich variabel. Die folgende Formel zeigt, wie das Bewegungsverhalten von Punkten üblicherweise modelliert wird:

$$\mathbf{X}_{\text{aktuell}}(t) = \mathbf{X}_{\text{reduziert}}(t_0) + \mathbf{v}\mathbf{X} \cdot (t - t_0) + \sum \Delta\mathbf{X}_i(t) \quad (2)$$

Um die aktuelle Position $\mathbf{X}_{\text{aktuell}}$ eines Punktes zum Zeitpunkt t zu ermitteln, werden als Grundlage dessen Stationskoordinaten $\mathbf{X}_{\text{reduziert}}$ zu deren Bezugszeitpunkt t_0 herangezogen und mithilfe der Stationsgeschwindigkeiten $\mathbf{v}\mathbf{X}$ sowie verschiedener Korrekturterme auf den gewünschten Zeitpunkt t transformiert. Die Stationsgeschwindigkeiten tragen den langsamen kontinuierlichen Bewegungen Rechnung – im Wesentlichen der Plattentektonik. Bewegungen, die aus den Gezeiten der festen Erde, den Polgezeiten oder Ozean- und Atmosphärenauflasteffekten etc. resultieren, werden durch die Korrekturterme $\sum \Delta\mathbf{X}_i$ berücksichtigt.

Aktuelle Positionen, wie sie mithilfe von (2) ermittelt werden können, variieren bereits im Tagesgang um einige Dezimeter. Im Zusammenhang mit Positionierungsaufgaben werden die Bewegungen, denen die Korrekturterme $\sum \Delta\mathbf{X}_i$ Rechnung tragen, als störend wahrgenommen. Daher werden normalerweise keine aktuellen Positionen angegeben, sondern reduzierte Positionen $\mathbf{X}_{\text{reduziert}}$. Diese beziehen sich hinsichtlich der Korrekturterme $\sum \Delta\mathbf{X}_i$ auf reduzierte Zustände (conventional-tide-free, Standardatmosphäre etc.) und folgen nur noch den langsamen kontinuierlichen Bewegungen. (2) geht bei der Ermittlung der aktuellen Position von reduzierten Koordinaten aus und schreibt diese auf den aktuellen Zustand fort. Reduzierte Positionen folgen noch den kontinuierlichen Bewegungen der Plattentektonik und müssen daher in globalen Bezugssystemen vom jeweiligen Bezugszeitpunkt t_0 auf den gewünschten Zeitpunkt t transformiert werden:

$$\mathbf{X}_{\text{reduziert}}(t) = \mathbf{X}_{\text{reduziert}}(t_0) + \mathbf{v}\mathbf{X} \cdot (t - t_0) \quad (3)$$

Aufgrund der diskutierten Phänomene können Positionsangaben in globalen Bezugssystemen nicht als statisch angesehen werden. Bei globaler Betrachtungsweise muss die Erdoberfläche als ein kinematisches Punktfeld behandelt werden. Deshalb erfolgt für die Stationen globaler geodätischer Netze (z. B. IGS-Permanentstationsnetz) u. a. die Schätzung von Stationsgeschwindigkeiten, wobei die Stationskoordinaten in reduzierter Form angegeben werden. Zu einer vollständigen Positionsangabe gehören im ITRS somit neben den Koordinaten zumindest die Angabe des Bezugszeitpunktes t_0 sowie die Geschwindigkeiten in den Koordinatenrichtungen.

5.3 World Geodetic System 1984 (WGS84)

Das WGS84 ist das Bezugssystem des GPS, seine Systemdefinition entspricht im Wesentlichen dem ITRS. Der Zugriff auf das WGS84 erfolgt bei der gewöhnlichen absoluten Echtzeit-Positionsbestimmung (SPS), indem der Nutzer seine Position durch Anschluss an die GPS-Satelliten bestimmt. Die Positionen der Satelliten werden in Form der Broadcast Ephemeriden mit der Navigationsnachricht übermittelt und beziehen sich auf die jeweils aktuelle Realisierung. Grundlage für die Berechnung der Broadcast Ephemeriden sind die Beobachtungen und Koordinaten der Monitorstationen des GPS-Kontrollsegments. Somit werden die Broadcast Ephemeriden an die Koordinaten der Monitorstationen angeschlossen, die das WGS84 realisieren. Die Bestimmung der Realisierungen des WGS84 wiederum findet von Zeit zu Zeit durch Anschluss der Monitorstationen an den jeweils aktuellen Bezugsrahmen des ITRS statt. Daher sind die Realisierungen des WGS84 mit den verschiedenen ITRFs konsistent. Für die Konsistenz zwischen den Realisierungen des WGS84 und des ITRS gilt laut NIMA (2004):

- WGS84(G730): Konsistenz mit ITRF92 auf 10 cm-Level
- WGS84(G873): Konsistenz mit ITRF94 auf 2 cm-Level
- WGS84(G1150): Konsistenz mit ITRF2000 auf 1 cm-Level

Seit dem Jahr 2002 ist der Bezugsrahmen G1150 die aktuelle Realisierung des WGS84. Aus der Aufzählung geht hervor, dass Positionsangaben, die sich auf den aktuellen Bezugsrahmen G1150 des WGS84 beziehen, ohne Einschränkungen als ITRS-Koordinaten im Bezugsrahmen ITRF2000 betrachtet werden können und umgekehrt. Aufgrund der geringen Differenzen zwischen dem ITRF2000 und dem ITRF2005 gilt diese Aussage auch in Bezug auf den derzeit aktuellen Bezugsrahmen ITRF2005 des ITRS.

5.4 OmniSTAR-Positionsangaben

OmniSTAR-Positionsangaben bezogen sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen auf den Bezugsrahmen ITRF2000. Ende des Jahres 2008 wurde OmniSTAR auf den Bezugsrahmen ITRF2005 umgestellt. Da die aktuelle Realisierung G1150 des WGS84 in hohem Maße mit dem Bezugsrahmen ITRF2000 des ITRS konsistent ist und die Unterschiede zwischen den Bezugsrahmen ITRF2000 und ITRF2005 nur sehr gering sind, dürfen OmniSTAR-Positionsangaben zugleich als WGS84-Koordinaten angesehen werden. Es ist anzunehmen, dass das geodätische Datum der OmniSTAR-Dienste auch in Zukunft von Zeit zu Zeit an den jeweils aktuellen Bezugsrahmen des ITRS angepasst wird. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Koordinaten werden jedoch nur sehr gering sein.

OmniSTAR-Koordinaten sind im Sinne von Abschnitt 5.2 reduziert (Erdgezeiten, Ozeanauflasteffekte, etc.); vgl. Lapucha et al. (2005). Die Positionsangaben des OmniSTAR-Systems folgen jedoch den kontinuierlichen langfristigen Bewegungen der Plattentektonik. Bezugs-epoche der gemessenen Positionen ist jeweils der Zeitpunkt der Messung. Da die Erdoberfläche bei globaler Betrachtungsweise als kinematisches Punktfeld anzusehen ist, müssen gemessene Positionen bei Bedarf mithilfe von (3) vom Zeitpunkt der Messung t_0 auf den gewünschten Zeitpunkt t transformiert werden. Falls diese zeitliche Transformation erfolgen soll, stellt sich die Frage nach den Geschwindigkeiten $\mathbf{v}_X$. Da diese nicht von OmniSTAR geliefert werden, bestehen grundsätzlich die folgenden Möglichkeiten der Beschaffung:

- Ableitung aus Langzeitbeobachtungen,
- Interpolation aus Geschwindigkeiten umliegender Stationen und
- Bewegungsmodelle der globalen Plattentektonik.

Die Ableitung aus Langzeitbeobachtungen ist lediglich theoretisch möglich. Im Gegensatz dazu bietet sich die Ableitung aus den Geschwindigkeiten umliegender Stationen an. Neben anderen Diensten bietet beispielsweise der Internationale GNSS Dienst (IGS) die Koordinaten und Geschwindigkeiten seiner weltweit etwa 200 Stationen kostenfrei zum Download an. Somit stehen durch den IGS weltweit mit relativ hoher Dichte Geschwindigkeiten zur Verfügung. Es ist daran zu denken, dass die Interpolation nicht über Plattengrenzen hinweg erfolgen sollte. Auch Modelle, die die globalen Plattenbewegungen beschreiben, sind für die Beschaffung von Geschwindigkeiten geeignet. In diesem Zusammenhang sei das Modell »NUVEL1A« genannt.

Üblicherweise ist der Umgang mit statischen, festen Koordinaten gewünscht. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Transformation der OmniSTAR-Positionsangaben in ein regionales, nationales oder lokales Bezugssystem, in dem die Bewegungen der betreffenden tektonischen Platte gegenüber dem Bezugssystem so gering sind, dass Geschwindigkeiten vernachlässigt werden können. Für den Bereich Europas bietet sich in diesem Zusammenhang das ETRS89 an. Da dieses per Definition fest mit dem stabilen Teil der eurasischen Platte verbunden ist, müssen Geschwindigkeiten gewöhnlich nicht berücksichtigt werden. Für die Durchführung der Transformation kommen folgende Vorgehensweisen in Frage:

- Transformation mit bekannten Parametern,
- Transformation mit identischen Punkten (relative Methode).

Bei der ersten Methode kann die Beschaffung von Transformationsparametern problematisch werden. Die relative Methode, die auch von Visser (2007) empfohlen wird, hat hingegen den Vorteil, dass anhand der Bestimmung identischer Punkte für jedes Gebiet die Berechnung lokal angepasster Transformationsparameter möglich ist.

Zudem werden durch die relative Methode verbleibende systematische Effekte in den mit OmniSTAR gemessenen Koordinaten eliminiert, die sich auf alle im Verlauf einer Messung erfassten Koordinaten gleich auswirken.

6 Organisation von OmniSTAR

Bei »Fugro« handelt es sich um eine Gruppe weltweit operierender Unternehmen, die Dienstleistungen in den Bereichen Vermessung, Positionierung sowie in der Geotechnik und im Umweltbereich anbieten. Die Struktur der Fugro-Gruppe und ihrer untergeordneten Abteilungen bzw. Unternehmensgruppen sowie ihrer Positionierungsdienste ist schwer zu überschauen. Deshalb erfolgt hier nur eine vereinfachte Betrachtung. Eine von drei Abteilungen der Fugro-Unternehmensgruppe ist die Vermessungsabteilung, der u.a. die verschiedenen Positionierungsdienste angehören. Letztere untergliedern sich in folgende Gruppen:

- OmniSTAR,
- Starfix,
- SeaSTAR.

Die Dienste dieser Gruppen wenden sich an unterschiedliche Nutzergruppen bzw. Anwendungsbereiche. Während OmniSTAR ausschließlich für die Anwendung auf dem Festland zur Verfügung steht, handelt es sich bei Starfix und SeaSTAR um reine Offshore-Dienste. Starfix richtet sich an den professionellen Nutzer, der Vermessungsaufgaben auf See durchführen möchte. SeaSTAR ist im Wesentlichen für die dynamische Positionierung von Wasserfahrzeugen im Hochseebereich gedacht. Die verschiedenen Gruppen greifen auf dieselbe Infrastruktur (Fugro-Referenzstationsnetz, Uplink-Stationen, etc.) zurück und bieten zudem weitgehend die gleichen Positionierungsdienste an. So existieren von allen drei Gruppen neben weiteren Diensten jeweils ein HP- und ein XP-Dienst (OmniSTAR HP/XP, SeaSTAR HP/XP, Starfix.HP/Skyfix.XP). Für die Nutzung der OmniSTAR-, SeaSTAR- und Starfix-Dienste wird allerdings jeweils unterschiedliche Hardware benötigt.

Die Bereitstellung der OmniSTAR-Dienste fällt in den Zuständigkeitsbereich der OmniSTAR-Unternehmensgruppe. Diese vertreibt zudem unter der Bezeichnung »AirSTAR« Lizenzen für den Bereich der Luftfahrt. Auch hier existieren ein HP- und ein XP-Dienst. Die OmniSTAR-Gruppe umfasst vier Subunternehmen, die den Vertrieb der OmniSTAR-Dienste in den ihnen zugeordneten Servicebereichen wahrnehmen. Für den Servicebereich Europa, Nordafrika und Westasien ist OmniSTAR B.V. mit Sitz in Leidschendam, Niederlande, zuständig. Die Bereitstellung der Dienste erfolgt nach einem Bepreisungsmodell, das hinsichtlich der Art des gewünschten Dienstes, der Gültigkeitsdauer sowie der geographischen

Abdeckung gestaffelt ist. Bezüglich der geographischen Abdeckung existieren folgende Typen:

- Regionale Lizenz (eine Region bzw. ein Staat),
- Kontinentale Lizenz,
- Globale Lizenz.

Für eine regionale OmniSTAR-Jahreslizenz, die beispielsweise für den Bereich Deutschlands gilt, fallen nach der aktuellen Preisliste (Stand 2008) von OmniSTAR B.V. Kosten von 1595€/a für OmniSTAR HP+ und 1195€/a für OmniSTAR VBS an. Eine OmniSTAR-fähige Ausrüstung (Antenne plus Empfänger) inklusive regionaler Jahreslizenz kann für etwa 6500€ (OmniSTAR HP+) bzw. ca. 3500€ (OmniSTAR VBS) erworben werden.

7 Anwendungen und Nutzer

Das Spektrum der Nutzer bzw. der möglichen Anwendungen für die OmniSTAR-Positionierungsdienste ist sehr breit. Die wichtigsten Bereiche, in denen OmniSTAR bereits genutzt wird, sind

- Precision Farming, Maschinensteuerung,
- Vermessung, Erfassung von Geodaten,
- Mobile Mapping,
- Airborne Laserscanning, Luftbildphotogrammetrie und
- Steuerung unbemannter Flugobjekte, z. B. Drohnen.

Über die Erfahrungen im Umgang mit den OmniSTAR-Positionierungsdiensten sowie über Genauigkeitsanalysen wird im zweiten Teil dieses Aufsatzes berichtet.

Danksagung

Die Studie zur Untersuchung von OmniSTAR wurde vom Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr (AGeoBw) und vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Geschäftsfeld Navigation, in Greding (WTD81) beauftragt. Im Fokus stand die Überprüfung der spezifizierten Leistungsfähigkeit des OmniSTAR-HP-Dienstes bei einem weltweiten Einsatz. Die Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgt auf Anregung durch die Auftraggeber der Studie. Die Autoren dieses Aufsatzes bedanken sich auch auf diesem Wege nochmals für die jederzeit konstruktive und gute Zusammenarbeit. Der Dank gilt auch den Ansprechpartnern von OmniSTAR B.V., Leidschendam, die bei Rückfragen häufig entscheidend weiterhelfen konnten.

Literatur

- Fugro: »Fugro introduces new High Performance Satellite Navigation Service«, Fugro News, www.fugro.com/news/newsdetails.asp?item=427, 03.12.2008 (Stand des Links: 12.12.2008).
- Lapucha, D., Barker, R., Zwaan, H.: Wide Area Carrier Phase Positioning. *European Journal of Navigation*, Vol. 3, No. 1, pp. 10–16, 2005.
- NIMA (2004): Addendum to NIMA TR 8350.2: Implementation of the World Geodetic System 1984 (WGS 84) Reference Frame G1150, <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/-Addendum%20NIMA%20TR8350.2.pdf> (Stand des Links: 26.09.2008), Stand des Dokuments: Oktober 2004.
- Ørpen, O., Melgard, T.E.: Advances in DGPS Systems. *European Journal of Navigation*, Vol. 3, No. 2, pp. 29–33, 2005.
- OmniSTAR: »Weltweite DGPS-Dienste von OmniSTAR«, Broschüre, Mai 2006, www.omnistar.nl/DOWNLOAD/brochures/GER_complete%20Service%20leaflet_070205.pdf, (Stand des Links: 12.12.2008).
- Tessmer, V.: Das stochastische Modell bei der VLBI-Auswertung, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München, DGK Reihe C, Nr. 573, 106 S., 2004.
- Visser, H.: OmniSTAR's HP worldwide service for decimetre GIS mapping, www.omnistar.nl/download/brochures/OmnistarWWPosRev1_2.pdf (Stand des Links: 10.09.2008), 2006.
- Visser, H.: OmniSTAR: A DGPS Service for GIS Mapping. *Geomatics World*, March/April 2007, pp. 22–24, 2007.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. habil. Hansbert Heister
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
 Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kerraschk (Projektmitarbeiter bis 31.8.2008)
 Dipl.-Ing. Andreas Pflugmacher
 Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

h.heister@unibw.de
otto.heunecke@unibw.de
andreas.pflugmacher@unibw.de