

GNSS-Referenznetzkonzepte

Ihre Realisierungen im praktischen Vergleich

Etwa 70% aller Wirtschaftsprozesse und bei Energieversorgern sogar mehr als 80% aller Geschäftsprozesse erfordern einen Raumbezug. Dieser ist mit Hilfe von Positionierungsdiensten in wirtschaftlicher und einfacher Weise inzwischen einer großen Anzahl von Nutzern zugänglich. Daher kann in diesem Bereich von einem erheblichen Wachstumspotential ausgegangen werden.

Vor diesem Hintergrund gewinnt der Betrieb von GNSS-Referenzstations-Netzen und zugehörigen -Diensten zukünftig erheblich an Bedeutung.

Besonders verheißungsvoll für alle Nutzer ist die Bekanntgabe einer Vertriebspartnerschaft zwischen ascos und der AdV (SAPOS) im Sinne einer Public Private Partnership (PPP) anlässlich des 4. SAPOS-Symposiums in Hannover am 22. Mai 2002. Dieser Schritt ermöglicht bereits in Kürze einen einheitlichen präzisen Dienst für die Bundesrepublik Deutschland.

Auch die Entscheidung der Europäer für den Aufbau eines eigenen Satelliten-Navigationssystems namens GALILEO wird positive Impulse für die Nutzung derartiger Dienste geben.

Einleitung

Seit Einführung des Navstar-GPS Anfang der 90er Jahre unterliegt die satellitengestützte Positionierung einer kontinuierlichen Entwicklung.

Auf Anwenderseite ermöglichen GNSS-Ausrüstungen und Kommunikationseinheiten inzwischen eine komfortable RTK-(Echtzeit-)Lösung mit Positionierungen im cm-Bereich.

In Deutschland haben sich die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer (zusammengeschlossen in der AdV, Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen) Mitte der 90er Jahre entschlossen, einen flächendeckenden Satellitenpositionierungsdienst (SAPOS) einzurichten. Dabei wurde ursprünglich ein Konzept alleinstehender Referenzstationen erarbeitet. Ein Nutzer dieses Dienstes (Rover) empfängt die Korrekturdaten der ihm nächstgelegenen Referenzstation. Die In-

vestition in eine eigene Referenzstation entfällt somit für den Nutzer.

Neben einem globalen Monitoring der jeweiligen Systembetreiber, beispielsweise durch fünf Monitorstationen weltweit für GPS, etabliert sich die regionale Verdichtung durch sogenannte Referenzstationsnetze. Insbesondere in den letzten beiden Jahren haben sich weltweit mehrere Anbieter dazu entschlossen, Referenzstationsnetze einzurichten.

Dabei werden ähnlich dem globalen Monitoring auf fest installierten Referenzstationen permanent GNSS-Rohdaten gesammelt, die zentral zur Bildung von Fehler- und Korrekturmodellen verarbeitet werden. GNSS-Anwender haben die Möglichkeit, mit Hilfe der von solchen Diensteanbietern bereitgestellten Modelle eine zuverlässige Positionierung vorzunehmen.

Idee der Vernetzung

Die für die cm-genaue Positionierung notwendige Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten (Mehrdeutigkeiten) wird direkt von den stations- und entfernungsabhängigen Fehlern beeinflusst.

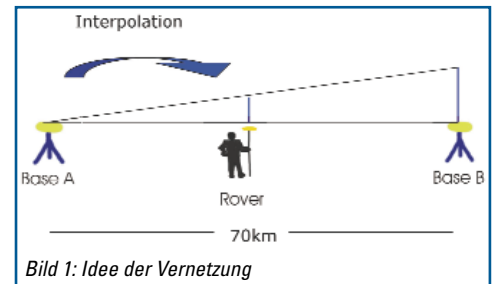
Zu den stationsabhängigen Fehlern zählen die Mehrwegeausbreitungen (Multipath), die Antennenphasenzentrumsvariationen PCV (Phase Center Variations) und das Messrauschen.

Entfernungsabhängige Fehler entstehen aus den Satellitenbahnfehlern, also ungenügend modellierten Bahndaten (Broadcast Ephemeriden), und durch die Ausbreitungsverzögerungen des GNSS-Signals in Troposphäre und Ionosphäre.

Die Reichweite einer fest installierten Referenzstation unterliegt einem sich je nach Stärke der Fehlereinflüsse richtenden Grenzbereich. Während die stationsabhängigen Fehler lokal auf der Referenzstation bzw. auf Roverseite wirken, wachsen die entfernungsabhängigen Fehler mit zunehmendem Abstand zwischen Referenzstation und Rover und stellen somit den limitierenden Faktor dar.

Vor diesem Hintergrund ist die Idee der Vernetzung von Referenzstationen geboren. Deren Grundgedanke ist, aus dem Ver-

gleich zwischen den Sollkoordinaten der Referenzstationen (Base) und den aus den GNSS-Beobachtungen gerechneten Koordinaten die Fehlereinflüsse zu modellieren. Die Bereitstellung der Korrekturdaten



für den Nutzer stellt im Prinzip eine Interpolationsaufgabe in einem Fehlermodell dar (Bild 1).

Der Abstand der Referenzstationen zueinander kann dadurch im Mittel um den Faktor 2 im Vergleich zum Einzelstationskonzept erhöht werden. Die dadurch erreichbare Verminderung der Anzahl von Referenzstationen über ein bestimmtes Gebiet trägt erheblich zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit eines Referenzstationsdienstes bei. Die zu wählende Entfernung der Referenzstationen zueinander hängt letztendlich von den verbleibenden entfernungsabhängigen Restfehlern ab. Dabei sind nicht modellierbare Fehler vorwiegend auf ionosphärische Störungen zurückzuführen. Hierbei ist eine Korrelation des störenden Einflusses der Ionosphäre auf die Positionierung mit dem Zyklus der Sonnenflecken, der Jahreszeit sowie der Tageszeit zu erkennen. Die Maxima fallen jeweils in die Maxima der Sonnenfleckenaktivität, in die Winter- beziehungsweise in die Mittagszeit. Die Restfehler aus den Bahndaten der Satelliten und die troposphärischen Restfehler fallen dagegen meist deutlich geringer aus.

Umsetzung

Die GNSS-Rohdaten der Referenzstationen werden in Echtzeit an eine Rechenzentrale gesendet. Die Verzögerungen dabei liegen im Bereich von 100 ms. Diese Daten aller Stationen werden von einer geeigneten Software für die Berechnung der

Vernetzung und die Fehlermodellierung herangezogen. Das Fehlermodell wird den Nutzern des Dienstes mit einer Aufdatierungsrate von 1 Sekunde in Form von Korrekturdaten bereitgestellt.

Die Berechnung der Vernetzung der Referenzstationen ist das Kernstück eines Referenznetzes. Zur Überwachung des Vernetzungsstatus sind umfassende grafische Darstellungen notwendig. In diesen müssen alle für das Monitoring entscheidenden Faktoren erkennbar sein. Dazu zählen unter anderem die Verfügbarkeit der Referenzstationen, Art der Ausgabe der Korrekturdaten, gelöste Mehrdeutigkeiten, verbleibende Restfehler, Datenqualität sowie Position und Lösungsstatus eines Rovers.

Als Softwarelösungen haben sich weltweit zwei Pakete etabliert:

- GPS-Network von Trimble Terrasat® (Höhenkirchen bei München) und
- GNSMART® mit dem Modul GNNET® von Geo++® (Garbsen bei Hannover).

Beide Softwarelösungen beruhen grundsätzlich auf zwei unterschiedlichen Ansätzen, die im Folgenden erläutert werden.

Theoretischer Hintergrund

Als Ausgangsgleichung kann die folgende Gleichung der Trägerphasenbeobachtung auf jeder einzelnen Referenzstation dienen:

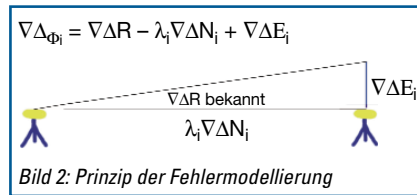
$$\Phi_i = R + c(dt - dT) - \lambda_i N_i + d_{orb} - d_{ion/\Phi_i} + d_{trop} + d_{mult/\Phi_i} + d_{ant/\Phi_i} + \epsilon_i$$

$i = 1, 2$ für L1, L2

mit:

R	Distanz Satellit-Empfänger
c	Lichtgeschwindigkeit
dt	Satellitenuhrfehler
dT	Empfängeruhrfehler
λ	Wellenlänge des GNSS-Signals
N	Phasenmehrdeutigkeiten
d_{orb}	Bahnfehler
$d_{ion/\Phi}$	Laufzeitfehler verursacht durch Ionosphäre
d_{trop}	Laufzeitfehler verursacht durch Troposphäre
$d_{mult/\Phi}$	Laufzeitfehler verursacht durch Multipath
$d_{ant/\Phi}$	Laufzeitfehler verursacht durch Antennenphasenzentrumsvariation
ϵ_i	Messrauschen

Diese Trägerphasenbeobachtungen werden an die Zentrale zur Fehlermodellierung geschickt. Anschaulich ist die Modellierung



anhand des Ansatzes über Doppeldifferenzen darstellbar, wie er derzeit von GPS-Network verwendet wird:

$$\nabla \Delta \Phi_i = \nabla \Delta R - \lambda_i \nabla \Delta N_i + \nabla \Delta \text{orb} - \nabla \Delta \text{ion}_i + \nabla \Delta \text{trop} + \nabla \Delta \text{mult}_i + \nabla \Delta \text{ant}_i + \nabla \Delta \epsilon_i$$

Werden die bei Bildung von Doppeldifferenzen verbleibenden Fehleranteile als ein Term $\nabla \Delta \epsilon$ zusammengefasst, so beschreibt die folgende Abbildung das Prinzip der Fehlermodellierung (Bild 2).

In einem Referenzstationsnetz kann von hochgenauen Stationskoordinaten ausgegangen werden, wodurch der Term $\nabla \Delta R$ als bekannt angenommen wird. Bevor die Beobachtungsresiduen $\nabla \Delta \epsilon$ bestimmt werden können, müssen die Mehrdeutigkeiten N zwischen den Referenzstationen gelöst werden. Danach stehen die Beobachtungsresiduen als Stützpunkte der jeweiligen Interpolationsansätze, beispielsweise in der Form einer Ebenengleichung, zur Verfügung.

GNSMART geht von undifferenzierten Trägerphasenbeobachtungen aus. Der Ansatz über undifferenzierte Beobachtungen nutzt die Dreifach- und Doppel-Differenzen nur zur Bestimmung von Näherungswerten, mit denen dann die originären Trägerphasenbeobachtungen in eine Ausgleichung eingeführt werden. Dort werden sämtliche Fehlereinflüsse über das gesamte Referenznetz-Gebiet geschätzt.

Die einzelnen Stationen sind nicht Stützpunkte eines Netzes aus einzelnen Dreiecksmaschen, sondern einer Fläche, über die alle relevanten Fehler modelliert werden.

Korrekturmodell und Korrekturparameter

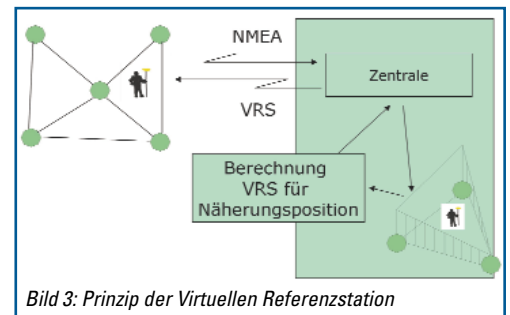
Steht das Korrekturmodell bereit, gibt es mehrere Möglichkeiten der Übermittlung an den Nutzer. Bei der Einführung der Vernetzungsidee wurde ausschließlich auf bestehende Standardformate (RTCM) zurückgegriffen.

Während GPS-Network mit dem Begriff der Virtuellen Referenzstation (VRS) in Verbindung gebracht wird, steht GNSMART

für den Lösungsansatz über die sogenannten Flächenkorrekturparameter (FKP).

Nach dem Prinzip der VRS ist zur Übermittlung an den Nutzer eine Zweiwegekommunikation (bi-direktional) erforderlich. Der Nutzer übermittelt zu Beginn seine Näherungsposition als NMEA-MESSAGE an die Zentrale. Dort interpoliert die Vernetzungssoftware diese Näherungsposition in das Fehlermodell. Die auf den Nutzer wirkenden Fehlereinflüsse werden ermittelt und es wird ein von Fehlern weitgehend bereinigter Korrekturdatensatz im RTCM-Format mit der vom Nutzer gesendeten Näherungsposition als (virtuelle) Referenzstation übermittelt (Bild 3). Zusätzlich werden Informationen in einer nicht standardisierten MESSAGE des RTCM-Formates an den Rover übermittelt. Mittlerweile können die meisten handelsüblichen Neugeräte auch diese Informationen in geeigneter Weise verarbeiten.

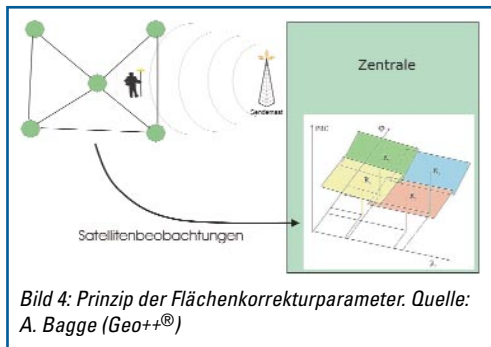
Das Prinzip der FKP stellt den Nutzern dagegen das gesamte Fehlermodell in



Form von Flächenkorrekturparametern zur Verfügung. Der Rover hat hier die Aufgabe, seine Position im Felde selbst in dieses FKP-Modell zu interpolieren und sich zusammen mit den RTCM-Korrekturen der nächstgelegenen Referenzstation optimale Korrekturen für seine Position zu bestimmen (Bild 4).

Als Kommunikationsmedium ist hier im Falle einer dezentralen Aussendung der Korrekturdaten eine Einwegekommunikation wie Funk prinzipiell ausreichend, technisch jedoch nicht leicht für ein größeres Gebiet zu realisieren. Daher bietet sich auch hier vor allem die Kommunikation über GSM an. Bei einer zentralen Datenübertragung für ein größeres Gebiet bleibt GSM als Kommunikationsweg unumgänglich.

Die Übermittlung von FKP ist derzeit noch nicht in einem internationalen Standard definiert. Daher wird bisher der RTCM-



Messagetyp 59 für deren Übermittlung herangezogen. Inzwischen ist eine Integration der für die Vernetzung erforderlichen Informationen in das RTCM-Format zu erkennen.

Realisierungen für Referenznetze

Für den Betrieb eines Referenznetzes sind im Wesentlichen vier Komponenten zu installieren:

1. Die Referenzstationen mit geodätischen GNSS-Zweifrequenzempfängern und GNSS-Referenzstationsantennen. Dabei ist aus geodätischer Sicht ein Standort zu finden und einzurichten, der die stationsabhängig wirkenden Fehler in optimaler Weise minimiert.
2. Die Kommunikationsanbindung der Stationen an das Rechenzentrum. Die Rohdaten müssen in Echtzeit störungsfrei an die Rechenzentrale weitergeleitet werden. Am häufigsten verbreitet ist derzeit die Lösung über Standleitungen.
3. Das Rechenzentrum mit der entsprechenden Software. Die Rohdaten werden von einer Vernetzungssoftware für die Fehlermodellierung aufbereitet. Auf der Hardwareseite sind entsprechend ausgerüstete Server und Kommunikationseinheiten notwendig.
4. Die Kommunikationsanbindung der Nutzer des Positionierungsdienstes an das Rechenzentrum. Dabei sind derzeit die bi-direktionale Verbindung über GSM sowie die Einwegkommunikation über Funk gebräuchlich.

Die Datenqualität der Referenzstationen ist ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der Fehlermodelle. Der stationsabhängige Fehler der Antennenphasenvarianzvariation kann inzwischen durch eine Antennenkalibrierung bis auf den Millimeter reduziert werden. Der Fehlereinfluss des Multipath kann derzeit nur bedingt durch die Software eliminiert werden. Daher

muss bei der Wahl des Standortes der Referenzstation auf eine reflexionsarme Umgebung geachtet werden. Allerdings sind inzwischen interessante Ansätze zur Kalibrierung des Multipath auf Referenzstationen zu erkennen (siehe Antennenworkshop anlässlich des 4. SAPOS-Symposiums).

Nach Einrichtung und Anbindung einer Referenzstation kann in der Zentrale das Tracking-Verhalten überwacht werden. Dabei ist eine störungsfreie Datenübertragung zu realisieren. Die Koordinaten der Referenzstationen, die in die Berechnung der Fehlermodelle einfließen, sollten in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden.

Allsat und Referenzstationsnetze

Telenor

Die norwegische Telefongesellschaft Telenor erteilte der Firma Allsat GmbH network+services im Jahre 2000 den Auftrag für die Unterstützung beim Aufbau eines

Referenzstationsnetzes in der Umgebung von Oslo (Bild 5).

Die vier oben genannten Schritte zur Installation eines Referenznetzes wurden in enger Zusammenarbeit durchgeführt. Während die Installation der Vernetzungssoftware in der Zentrale direkt vor Ort vorgenommen wurde, erfolgte das Monitoring des Referenznetzes über die Vernetzungssoftware grösstenteils über Remote Control von Hannover aus. Die Testphase mit der Suche nach einer optimalen Konfiguration der Vernetzungssoftware und mit umfangreichen Feldtests dauerte ein Jahr und wurde Ende 2001 mit Übernahme der vollständigen Kontrolle durch die norwegische Landesvermessung Statens Kartverk erfolgreich abgeschlossen.

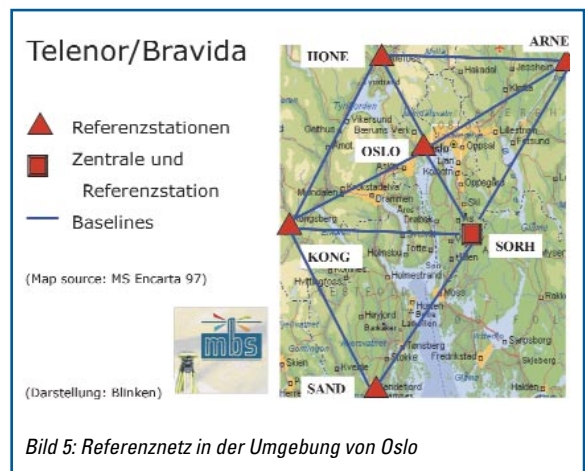
ascos – ruhrgas positioning services

Ein aktuelles Projekt der Allsat GmbH network+services ist der Aufbau und die Betreuung des ascos-Referenznetzes, das aktuell durch Integration des vorhandenen SAPOS-Netzes bundesweit ausgebaut

und in Kooperation mit den in der AdV zusammengeschlossenen Vermessungsverwaltungen vermarktet wird.

1998 fand die Ruhrgas AG mit Unterstützung der Allsat an, GNSS-Techniken für das Auffinden, die Einmessung und die anschließende Dokumentation von Gas-Versorgungsleitungen einzusetzen. Nach Abschluss eines 3-monatigen Pilotprojektes fiel die Entscheidung für eine gleichzeitige Nutzung der Satellitensysteme von GPS und GLONASS, um insbesondere in abgeschatteten Gebieten die Verfügbarkeit von präzisen Echtzeitpositionen so zu steigern, daß bei der Ruhrgas AG zukünftig auf konventionelle Vermessungstechniken vollständig verzichtet werden kann.

Bei der Größe des durch die Ruhrgas zu erfassende Gebietes wurde nach Erstellung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse schnell auf die Lösung mit einzelnen unternetzten Referenzstationen verzichtet. Im Rahmen einer Testphase wurden daraufhin sieben GNSS-Referenzstationen im



Kerngebiet der Ruhrgas in Nordrhein-Westfalen installiert. Die für die Vernetzung notwendige Zentrale wurde in Hannover bei der Allsat eingerichtet. Als Vernetzungssoftware wurde GPS-Network gewählt.

Dieses Testnetz ging nach erfolgreich verlaufenen Feldtests schnell in eine Produktionsphase über. Der aktuelle Ausbaustand des ascos-Referenznetzes ist in Bild 6 erkennbar. Dafür wurden Kommunikationseinrichtungen ausgebaut und optimiert, die eine hohe Verfügbarkeit des Dienstes garantieren.

ascos stellt einen präzisen Dienst mit einer erreichbaren Positionierungsgenauigkeit von 2 cm sowie einen einfachen Dienst mit

Präziser DGPS-Dienst

- Aktueller Stand
- Weiterer Ausbau

DGPS-Dienst

- 50 cm in Betrieb
- 50 cm Betrieb im 3. Quartal 2002



Bild 6: ascos-Referenzstationen

einer Positionierungsgenauigkeit von 50 cm seit Mai dieses Jahres bundesweit mit Ausnahme der Bundesländer Berlin-Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein (in der Abbildung orange gekennzeichnet) zur Verfügung. Das BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) stellt im Rahmen einer Kooperation weitere Referenzstationen zur Verfügung. Auch für die orange gekennzeichneten Bundesländer soll der einfache Dienst im dritten Quartal 2002 realisiert werden. Darüber hinaus führt das BKG als Bundesbehörde und Mitglied der AdV täglich die Qualitätskontrolle der GNSS-Daten des ascos-Referenznetzes und die Stabilitätsprüfung der Referenzstationskoordinaten durch.

Schwerpunkt bei der Einführung von ascos war und ist ein serviceorientierter Satellitenpositionierungsdienst. Der Nutzer wird z. B. aus der Zentrale über den aktuellen Status des Dienstes informiert, mittelfristig

über E-Mail und kurzfristig über SMS und Telefon.

Entscheidend hierfür ist ein zentrales Monitoring. Durchgehend werden die Statusinformationen des Referenznetzes überwacht. Insbesondere das Verhalten der GNSS-Empfänger auf den Referenzstationen sowie der Zustand der Vernetzung werden beobachtet.

Neben der von der Zentrale ausgehenden Mitteilung von Statusinformationen an den Nutzer hat ascos eine Hotline eingerichtet, die es dem Kunden ermöglicht, bei Fragen während der Positionierung im ascos-Dienst telefonischen Support einzuholen. Bei derartigen Anfragen ist eine grafische Anzeige der Nutzer im Referenznetz hilfreich, um gezielt mögliche Ursachen ausschließen zu können.

Um das Angebot für den Nutzer zu optimieren, wurde die Referenzstationssoftware GNSMART[®] parallel zu GPS-Network installiert.

Ausblick – Entwicklungen

Der ascos-Positionierungsdienst steht inzwischen in der Produktionsphase. Die Anzahl ruhrgas-zugehöriger Nutzer wird bei weitem von der Gesamtzahl anderer Nutzer übertroffen und ist ein Zeichen für Akzeptanz des Dienstes.

Der störende Einfluss der Ionosphäre auf die Satellitenpositionierung wie insbesondere in den letzten beiden Wintern erfahren wird in den nächsten sechs Jahren aufgrund der Abnahme der Sonnenflecken (Sonnenzyklus) nicht mehr so gravierend ausfallen. Ergebnisse aus dem zweiten Quartal dieses Jahres haben gezeigt, dass die Rover inzwischen wieder schneller initialisieren können.

Aufgrund der Erfahrungen mit den ionosphärischen Einflüssen auf die satellitengestützte Positionierung findet ein intensiver Erfahrungsaustausch zwischen der Allsat und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) statt. Ziel eines gemeinsamen Forschungsvorhabens ist die Ermittlung geeigneter Indikatoren zur Beurteilung ionosphärischer Störungen, die zum Aufbau eines Frühwarnsystems herangezogen werden können.

Der Startschuss für das europäische Satellitensystem GALILEO ist im Frühjahr 2002 gefallen. Das System soll neben GPS und GLONASS im Jahr 2008 mit 30 Satelliten in den Vollbetrieb gehen. Erste operable GALILEO-Satelliten sollen bereits ab 2006 verfügbar sein. Darauf werden die Hersteller von GNSS-Empfängern reagieren und ihre Geräte für den Empfang der GALILEO-Signale vorbereiten. Mit GALILEO verdoppelt sich dann voraussichtlich die Anzahl der GNSS-Satelliten. Die dadurch erheblich gesteigerte Verfügbarkeit von Satellitensignalen sollte dann auch in stark abgeschatteten Gebieten zu zuverlässigen und präzisen Ergebnissen führen und die Positionierung mit GNSS weiter verbreiten. Referenzstationsnetze und Positionierungsdienste werden mit dieser Entwicklung erheblich an Bedeutung gewinnen.

Autoren

Dipl.-Ing. Bastian Huck, Dipl.-Ing. Anette Ross,
Dipl.-Ing. Jürgen Rüffer,
c/o Allsat GmbH network + services,
Am Hohen Ufer 3A,
30159 Hannover,
E-Mail: huck@allsat.de, ross@allsat.de,
rueffer@allsat.de