

Qualitätssicherung bei GNSS-Diensten*

Lambert Wanninger

Zusammenfassung

Satellitengestützte Positionsbestimmung basiert auf Diensten, die Messsignale und Informationen zur Verfügung stellen. Die Produkte dieser Dienste und auch die gewonnenen Positionsinformationen müssen Qualitätsanforderungen wie Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität, erfüllen. Je nachdem, ob der Dienst eher für Navigationsanwendungen oder für geodätische Anwendungen gedacht ist, unterscheiden sich die Maßnahmen der Dienste zur Qualitätssicherung ihrer Produkte. Weitere Maßnahmen zur Qualitätssicherung müssen auf Nutzerseite ergriffen werden.

Summary

Satellite based positioning depends on services which provide measurement signals and data. The service products and also the determined positions must meet quality requirements such as availability, accuracy and integrity. The necessary measures for quality assurance of the service products depend much on the service application, either for navigation or for geodetic purposes. Additional measures for quality assurance must be taken by the user.

Schlagworte: GNSS, GNSS-Dienste, Qualitätsanforderungen, Qualitätssicherung

1 Einführung

Die *Global Navigation Satellite Systems* (GNSSs) werden u. a. für Positionsbestimmungen genutzt, d. h. sie dienen dazu, Positionen in der Form von dreidimensionalen Koordinaten zu erzeugen. Die Qualität dieser Positionen ergibt sich daraus, dass die an sie gestellten Anforderungen, insbesondere Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität (Zuverlässigkeit), erfüllt werden. Die Qualitätssicherung umfasst die Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

* Überarbeitete Fassung des gleichnamigen Vortrags beim 93. DVW-Seminar »Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren« am 10./11. Juni 2010 in Hannover. Die Seminarbeiträge sind als Band 61 der Schriftenreihe des DVW im Wißner-Verlag erschienen.

Positionsbestimmung mithilfe eines oder mehrerer GNSS, wie z. B. das US-amerikanische GPS, das russische GLONASS oder in Zukunft auch das europäische Galileo oder das chinesische Compass, beruht in starkem Maße auf Diensten, auf die der Nutzer der Systeme angewiesen ist. Zuerst einmal sind die Systeme selbst Dienste, die Messsignale zur Verfügung stellen, die von Satelliten ausgestrahlt werden. Der Nutzer verwendet diese Signale für Pseudostreckenmessungen entweder auf der Signalmodulation (Code) oder direkt auf dem Trägersignal (Phase).

Zur Berechnung der Position sind aber noch weitere Informationen notwendig, die von den Systemen selbst oder von anderen Diensten zur Verfügung gestellt werden. Dazu gehören zumindest die Koordinaten der Satelliten (Orbits) und die Korrekturen der Satellitenuhren zur Uhrsynchronisation in einem gemeinsamen Zeitsystem.

Da es sich bei den GNSS-Systemen in erster Linie um Navigationshilfsmittel handelt, sind die Anforderungen an die Qualität der Signale und Informationen im Allgemeinen andere als die für typische geodätische Anwendungen. Bei Navigationsanwendungen steht die (Echtzeit-) Verfügbarkeit und die Integrität der Informationen im Vordergrund, bei vielen geodätischen Anwendungen dagegen die Genauigkeit. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die GNSSs nicht für Anwendungen im cm- oder sogar mm-Genauigkeitsniveau ausgelegt wurden, sondern für Genauigkeiten ursprünglich im viele 10m-Niveau, in jüngerer Zeit eher 1m-Niveau. Die Qualitätssicherung muss somit nicht nur auf das Messverfahren abgestimmt sein, sondern insbesondere auch auf die Bedürfnisse spezifischer Nutzergruppen.

Dieser Beitrag behandelt Maßnahmen zur Qualitätssicherung von GNSS-Diensten. Nach einer Einführung in GNSS-Messmethoden und die dafür notwendigen Dienste wird ein Überblick über Beobachtungsredundanzen bei GNSS gegeben und der Aspekt der Kalibrierung behandelt. Im Kernkapitel dieses Beitrags werden Qualitätsanforderungen und Qualitätssicherung bei GNSS-Diensten exemplarisch vorgestellt. Dies wird abschließend ergänzt durch die Beschreibung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung auf Nutzerseite.

2 GNSS-Messmethoden und Dienste

So wie GNSS heutzutage genutzt wird, besteht es aus einer Vielzahl unterschiedlicher aber eng verwandter Messmethoden. Je nach Messmethode ist der Nutzer auf zusätzliche Dienste, die über das eigentliche GNSS hinausgehen, angewiesen.

Das hauptsächlich genutzte Messverfahren basiert auf dem bei GPS als *Standard Positioning Service* (SPS) bezeichneten Dienst, der bei GPS augenblicklich Einfrequenz-Signale mit C/A-Code zur Verfügung stellt. Die anderen von GPS-Satelliten ausgestrahlten Signale

sind entweder keine zivilen Signale (L1- und L2-P-Code, M-Code) oder gelten als noch nicht operationell (L2C, L5), weil noch nicht genügend entsprechend befähigte Satelliten existieren. Die Nutzung der Phasenmessungen ist beim SPS nicht berücksichtigt.

Alle anderen in Tab. 1 aufgeführten Messverfahren bedürfen Zusatzinformationen, die heutzutage in den allermeisten Fällen durch Zusatzdienste zur Verfügung gestellt werden. Hier ist der Anwender also auf mehrere Dienste angewiesen: zum einen auf GNSS selbst und zusätzlich auf (mindestens) einen weiteren Dienst.

Die Zusatzdienste unterscheiden sich in Bezug auf ihre Schwerpunkte bei der jeweiligen Qualitätssicherung deutlich, je nachdem ob die Nutzerzielgruppe aus dem Navigationsbereich kommt oder eher aus dem Bereich Geodäsie. Weitere Unterschiede entstehen dadurch, dass der Kommunikationsaspekt von den Diensten entweder mit abgedeckt wird oder aber nicht.

Bei Navigationsdiensten ist die Datenkommunikation in aller Regel ein inhärenter Bestandteil des Dienstes. Beispiele für Navigationsdienste sind

- die verschiedenen GNSS selbst (GPS, GLONASS, in Zukunft Galileo, Compass),
- die *Satellite Based Augmentation Systems* (SBASs) wie z. B. das US-amerikanische WAAS, das japanische MSAS und das europäische EGNOS, die primär für Luftfahrtanwendungen konzipiert worden sind,
- der DGPS-Dienst der deutschen Wasser- und Schifffahrtverwaltung (WSV) für Anwendungen in der Schifffahrt,
- PPP-Dienste kommerzieller Anbieter wie Veripos, Omnistar/Fugro oder StarFire/John Deere.

Dienste, die primär auf geodätische Anwendungen ausgerichtet sind, machen meistens einen zusätzlichen Kommunikationsdienst, der organisatorisch getrennt ist (z. B. Mobiltelefon, *Internetprovider*), notwendig. Beispiele für geodätische Dienste sind

- der *International GNSS Service* (IGS) insbesondere mit seinen Produkten präziser Satellitenorbits und präziser Satellitenuhrkorrekturen, aber auch den Beobachtungsdaten weltweit verteilter Referenzstationen und Stationskoordinaten; ähnlich auch das *EUREF Permanent Network* (EPN),
- Netz-RTK-Dienste wie z. B. in Deutschland SAPOS, ascos und Trimble *VRS Now*, die insbesondere in Echtzeit Referenzstationsinformationen für eine cm-genaue Positionsbestimmung bereitstellen.

3 Qualitätsanforderungen bei GNSS

Die wichtigsten Qualitätsanforderungen bei einer GNSS-Positionsbestimmung sind Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität des Endproduktes, also der Position in der

Tab. 1: GNSS-Messmethoden und zugehörige Dienste

Messmethode	Genauigkeit	Notwendige Dienste
Code-Messungen als primäre Beobachtungsgröße		
Standard Positioning Service (SPS)	10 m	GNSS (vgl. Abschnitt 6.1)
DGNSS (Differenzielles GNSS, einzelne Referenzstationen)	dm-m	GNSS, Dienst für Codekorrekturen, z. B. DGPS-Dienst der WSV (vgl. Abschnitt 6.2)
WADGNSS (Wide-Area DGNSS) oder Netz-DGNSS (ähnlich DGNSS, aber Netz von Referenzstationen)	dm-m	GNSS, Dienst für Zusatzinformationen (Orbits, Satellitenuhr, Ionosphäre), z. B. SBAS
Phasen-Messungen als primäre Beobachtungsgröße		
Precise Point Positioning (PPP, präzise Orbits und Satellitenuhrkorrekturen)	cm-dm	GNSS, Dienst für präzise Orbits und Satellitenuhrkorrekturen, z. B. IGS oder kommerzielle Anbieter (vgl. Abschnitt 6.3)
RTK (Real-Time Kinematic, einzelne Referenzstation, Mehrdeutigkeitsfestsetzung)	cm	GNSS, Dienst für Referenzstationsbeobachtungen oder eigene Referenzstation
Netz-RTK (ähnlich RTK, aber Netz von Referenzstationen)	cm	GNSS, flächenhafter Dienst für präzise Zusatzinformationen bzw. virtuelle Referenzstationen, z. B. SAPOS-HEPS (vgl. Abschnitt 6.4)
Kurzzeit-statisch (kleinräumig)	cm	GNSS, flächenhafter Dienst für präzise Zusatzinformationen bzw. virtuelle Referenzstationen, z. B. SAPOS-HEPS oder -GPPS (vgl. Abschnitt 6.4)
Langzeit-statisch (großräumig)	mm-cm	GNSS, Referenzstationsdaten z. B. vom IGS, präzise Orbits vom IGS

Form von Koordinaten. Die meisten Dienste behandeln diese Qualitätsanforderungen nur in Bezug auf die von ihnen bereitgestellten Informationen, obwohl der Einfluss der Beobachtungen des Nutzers auf das Gesamtergebnis entscheidend sein kann, diese aber von den Diensten meist nicht beeinflussbar sind.

Einerseits bieten die GNSS einen Dienst von 24 Stunden am Tag und 365 Tagen im Jahr an und die von den Satelliten ausgestrahlten Mikrowellensignale decken die gesamte Erdoberfläche wetterunabhängig ab, andererseits werden die Signale aber an vielen Arten von »Sichthindernissen« absorbiert und reflektiert, sodass an vielen Orten keine (präzise) GNSS-Positionsbestimmung möglich ist. Die Eigenschaft der Verfügbarkeit von GNSS betrachtet nicht diese Problematik der »Sichthindernisse«. Diese gelten als GNSS-Anwendungsprobleme auf Nutzerseite und nicht als Probleme der Dienste. Die Verfügbarkeit als Qualitätsanforderung an GNSS-Dienste betrachtet vielmehr, ob diese räumlich im vorgesehenen Gebiet und zeitlich im Allgemeinen ohne jede Einschränkung vorhanden und nutzbar sind.

Viele geodätische Aufgabenstellungen haben Genauigkeitsanforderungen im cm- oder sogar mm-Bereich. Die GNSS selbst sind für diese Genauigkeiten eigentlich nicht gedacht. Trotzdem können sie aber mit entsprechendem Mehraufwand an Messungen und Datenauswertung, d. h.

auf der Basis zusätzlicher GNSS-Dienste, erzielt werden. Trotzdem sind diese hohen Genauigkeitsanforderungen nicht grundsätzlich erfüllbar, sondern bedürfen besonderem Aufwand und Sorgfalt sowohl auf der Dienste- wie auch auf der Nutzerseite. Die Dienste müssen sicherstellen, dass ihre Beiträge zur Positionsbestimmung die erwarteten Genauigkeiten erzielbar machen. Aber genauso wichtig ist die Qualität der Beobachtungen auf der Nutzerseite. Nur im Zusammenspiel von GNSS-Diensten und Nutzer-Beobachtungen sind Positionen in der gewünschten Genauigkeit erreichbar.

Die Integrität eines Dienstes ist als Wahrscheinlichkeit darstellbar, dass die gelieferten Informationen innerhalb der Spezifikationen liegen oder, wenn sie dies nicht tun, eine rechtzeitige Warnung an die Nutzer gesendet wird. Wichtige Einflussgrößen sind also die vorgegebenen Genauigkeitsspezifikationen und auch die maximale Zeit, die zwischen einem Überschreiten der Spezifikationsgrenzen und der Ankunft der Integritätswarnungen beim Nutzer vergehen darf. Die Integritätsanforderungen sind bei manchen Navigationsanwendungen, insbesondere bei solchen, bei denen der Schutz des menschlichen Lebens (*Safety of Life*) im Vordergrund steht, sehr hoch. Bei geodätischen Anwendungen sind sie oft von geringerer Bedeutung.

4 Redundanzen

Qualitätssteigerungen können vielfach durch Redundanzen erzielt werden. Redundanzen im Beobachtungsdatenmaterial ermöglichen die Erkennung grob fehlerhafter Beobachtungsdaten und die Abschätzung der Mess- und Modellgenauigkeit. Redundanzen bei den GNSS-Empfängern, Kommunikationsverbindungen, zentralen Auswerteprozessen etc. ermöglichen insbesondere, dass eine bessere Verfügbarkeit eines GNSS-Dienstes erreicht wird.

In diesem Abschnitt soll ein Blick auf Redundanzen bei der GNSS-Positionsbestimmung aus geodätischem Blickwinkel geworfen werden. Folgende Redundanzen bestehen vom Beobachtungsmaterial her, welche bei der Datenaufbereitung eines GNSS-Dienstes oder beim Auswerteprozess auf Nutzerseite verwendet werden, um grobe Fehler zu erkennen und zuverlässige Positionslösungen zu berechnen.

Beobachtungen zu mehr als vier Satelliten

Simultane Beobachtungen zu exakt vier Satelliten sind die Voraussetzung, dass dreidimensionale Positionsunbekannte und der Synchronisationsfehler der Empfängeruhr bestimmt werden können. Im Allgemeinen können alle weiteren Beobachtungen als redundant angesehen werden. Es kann aber auch selbst bei vier vorhandenen Signalen vorkommen, dass eine präzise Bestimmung der Unbekannten aufgrund schlechter Empfänger-Satellitengeometrie (große DOP-Werte) unmöglich ist. Zum Teil tritt dieses Problem bei GPS selbst auf abschattungsfreien Stationen auch noch bei fünf Satellitensignalen auf.

Beobachtungen zu mehreren Satellitensystemen

Dies erhöht nicht nur die Anzahl der empfangbaren Satellitensignale beträchtlich, sondern schützt auch vor Problemen in einzelnen Satellitensystemen. Der zweite Aspekt war bisher bei GPS nicht von Bedeutung, da GPS seit seiner Fertigstellung und Nutzungsfreigabe im Jahr 1995 nie einen Gesamtausfall zu verzeichnen hatte.

Beobachtungen auf mehreren Frequenzen

Alle GNSS-Systeme liefern Signale auf zwei (in Zukunft drei und mehr) Frequenzen. Bei vielen Messverfahren sind Zweifrequenzsignale für die Bestimmung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen notwendig. Messungen auf weiteren Frequenzen können dann als redundante Messungen aufgefasst werden. Bei einigen Messverfahren werden ionosphärische Einflüsse schon dadurch stark verringert oder sogar praktisch eliminiert, dass simultane Messungen mit mehreren Empfängern auf benachbarten Stationen durchgeführt werden (z.B. RTK). Hier stehen dann die Messungen auf der zweiten (oder in Zukunft weiteren) Frequenz insbesondere für die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten zur Verfügung und können zusätzlich als redundante Messungen verwendet werden.

Code- und Phasenmessungen

Pseudostreckenmessungen werden bei vielen Empfängern sowohl mit Code- als auch mit Phasenmessungen erzielt. Die beiden Arten von Messgrößen haben sehr unterschiedliche Eigenschaften. Die Codemessungen sind eindeutig, aber um einen Faktor in der Größenordnung 100 weniger genau als die mehrdeutigen Phasenmessungen. Der Vergleich von Code- und Phasenmessungen eignet sich einerseits zur Detektierung großer Phasensprünge (*Cycle-Slips*) bei den Phasenmessungen und andererseits zur Mehrwegeanalyse der Codemessungen.

Referenzstationsnetze

Die Dichte von Referenzstationsnetzen für WADGNSS oder Netz-RTK hängt insbesondere von der räumlichen Variabilität der Ionosphäre, deren Einfluss modelliert werden soll, ab. Die Netze werden so ausgelegt, dass auch bei überdurchschnittlich extremen ionosphärischen Verhältnissen noch Korrekturen ermittelt werden können, die die Dienstspezifikationen erfüllen. Vielfach ist die Ionosphäre aber schwächer und ungestörter. In diesen Situationen würde man mit einem weniger dichten Referenzstationsnetz auskommen bzw. kann die Beobachtungsdaten einiger Referenzstationen als redundante Beobachtungen verwenden. Integriert man ferner sogenannte Monitorstationen in das Stationsnetz, so liegen immer redundante Beobachtungen vor.

Statische Messungen oder vorliegende Vorinformationen über Bewegungsverhalten

Liegen Vorinformationen über das Bewegungsverhalten der Nutzerantenne vor, so können diese die Positionsbestimmung stützen. Im Extremfall werden statische Messungen durchgeführt, d.h. in den Einzelepochen muss zwar weiterhin der Synchronisationsfehler der Empfängeruhr bestimmt werden, die Koordinaten aber nur einmalig für den Gesamtdatensatz aller Epochen. Es ergeben sich somit viele redundante Beobachtungen.

Integration mit weiteren Sensoren

Vielfach ist die Hauptmotivation der Integration von GNSS mit anderen Sensoren (z.B. Inertialsystem, Kompass, Odometer, etc.), dass die Verfügbarkeit von GNSS aufgrund von Signalabschattungen in vielen Anwendungsfällen leicht gestört wird. Ist dagegen GNSS vollständig verfügbar, ergeben sich aus der Kombination der unterschiedlichen Sensoren Redundanzen, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Positionslösung verbessern.

5 Kalibrierung

Eine Kalibrierung dient insbesondere der Bestimmung von systematischen Messabweichungen. Sind diese längerfristig konstant oder wiederholen sie sich bei bestimmten Umgebungseinflüssen (z.B. in Abhängigkeit von der Temperatur), so können die bei der Kalibrierung bestimmten Korrekturen bei späterer Verwendung des Messgerätes zur Verbesserung der Messgrößen verwendet werden. Bei GNSS-Anwendungen gibt es folgende Einsatzmöglichkeiten für Kalibrierungen.

Antennenphasenzentren

Die Kalibrierung der Differenzen zwischen elektrischem Phasenzentrum und geometrischem Referenzpunkt einer GNSS-Antenne wird durch Antennenkalibrierung im Labor oder mit Feldverfahren bestimmt (Görres 2010). Sie ist nur bei solchen Anwendungen notwendig, bei denen

ermöglichen. Nach erfolgreicher Mehrdeutigkeitslösung können linear frequenzabhängige differenzielle Signalverzögerungen durch einen Zusatzparameter bei der Positionsbestimmung erfasst werden.

Mehrwegeeinflüsse auf Referenzstationen

Mehrwegeeinflüsse wirken systematisch, wenn die Empfangsstationsumgebung unverändert bleibt. Sie können dann als Funktion des Signaleinfallswinkels (Azimut und Elevation des Satelliten) modelliert werden und die dabei entstehenden Korrekturen an zukünftige Beobachtungen angebracht werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass Mehrwegeeinflüsse frequenzabhängig sind und deswegen auch Code- und Phasenbeobachtungen sehr unterschiedlich beeinflussen. Veränderungen in der Stationsumgebung führen zu Veränderungen der Mehrwegeeinflüsse. Dies gilt auch schon für Veränderung durch Niederschlag in der Form von Regen oder Schnee.

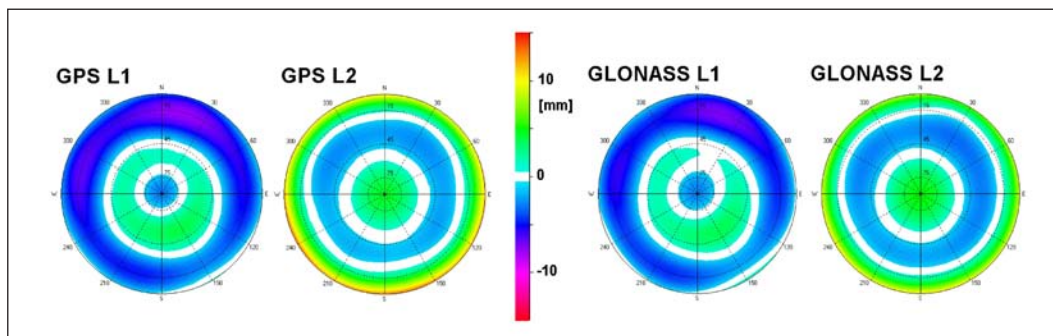


Abb. 1: Signalfrequenzabhängige Antennenkalibrierergebnisse einer GPS/GLONASS-Antenne für alle Signaleinfallswinkel

Genauigkeiten im cm-Niveau oder besser erzielt werden können. Da Antennen derselben Baugruppe ähnliche Kalibrierwerte besitzen, kann es bei vielen Anwendungen auch ausreichen, auf geeignete baugruppenspezifische Korrekturen zurückzugreifen, solange jede Antenne individuell geprüft wird, ob diese Korrekturen tatsächlich geeignet sind. Ein Beispiel für individuelle Kalibrierwerte einer Zweifrequenz-GPS/GLONASS-Antenne ist in Abb. 1 dargestellt.

Frequenzabhängige instrumentelle Signalverzögerungen

Das russische GLONASS-System arbeitet – im Gegensatz zu allen anderen GNSS – mit vielen benachbarten Frequenzen in den L1- und L2-Frequenzbändern. Bei GNSS-Empfängern treten in Abhängigkeit der Signalfrequenzen instrumentell bedingte Verzögerungen auf, die die Mehrdeutigkeitslösung der Phasenbeobachtungen behindern können und auch die Koordinatengenauigkeit beeinträchtigen (Wanninger und Wallstab-Freitag 2007). Da baugleiche Empfänger meistens – aber nicht immer – ähnliche Verzögerungen aufweisen, spielen diese bei differenziellen Verfahren unter Verwendung baugleicher Empfänger oft nur eine untergeordnete Rolle. In gemischten Basislinien müssen aber *a-priori*-Werte vorliegen (Abb. 2), um eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung zu

Signalstärke

Die Signalstärke hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab, zu denen insbesondere die Antenneneigenschaften gehören. Fällt die gemessene Signalstärke in der Form von S/N-Werten (Signal/Rausch-Verhältniswerten) anders aus, als eigentlich zu erwarten, so ist das ein deut-

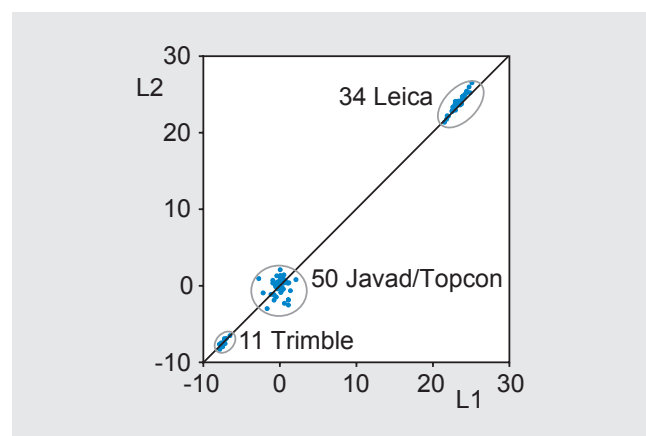


Abb. 2: Frequenzabhängige Signalverzögerungen zwischen benachbarten GLONASS-Frequenzen umgerechnet in Längeneinheiten (mm) für L1 und L2 von 95 individuellen GPS/GLONASS-Empfängern.

licher Hinweis darauf, dass die Beobachtungsdaten beeinträchtigt sind. Zur Beurteilung der Signalstärke ist somit ein Modell der Antennenempfindlichkeit notwendig, welches über eine S/N-Antennenkalibrierung gewonnen werden kann. Weiterhin ist es notwendig, Informationen über die Aussendesignalstärke der einzelnen Satelliten einzuführen, da sich diese z. T. deutlich unterscheiden.

6 Beispiele für Qualitätsanforderungen und Qualitätssicherung bei GNSS-Diensten

Qualitätsanforderungen und -sicherungsmaßnahmen hängen stark von der Nutzerzielgruppe eines Dienstes ab. So müssen bei GNSS-Diensten für die Positionsbestimmung zwischen solchen für Navigationsanwendungen und solchen für geodätische Anwendungen unterschieden werden. Im Folgenden werden Beispiele aus beiden Bereichen diskutiert.

6.1 GPS und SBAS

Im Vergleich zu den anderen GNSS ist die Offenheit des Systembetreibers bezüglich aktueller Informationen über das System und die Verfügbarkeit von Hintergrundinformationen bei GPS am größten. So enthalten die Schnittstellenbeschreibung Satelliten- zu Nutzersegment (u. a. IS-GPS-200 2006) und die Beschreibung des *Standard Positioning Service* (SPS) (GPS-SPS 2008) Informationen über die Qualitätsanforderungen und die die Qualität sichernden Maßnahmen.

Der SPS bezieht sich ausschließlich auf Einfrequenz-C/A-Code-Nutzer (GPS-SPS 2008), also nicht auf typische geodätische Anwendungen von GPS. Weiterhin geht er vielfach von der nominellen Satellitenkonstellation aus, die aus 24 Satelliten besteht, und nicht von der schon jahrelang existierenden Satellitenanzahl von etwa 30. Die Qualitätsangaben beziehen sich auf die einzelnen Satellitensignale und die ihnen aufmodulierten Informationen und somit auf die Einflüsse von Kontroll- und Satellitensegment. Nicht betrachtet werden die Einflüsse der Signalausbreitung (ionosphärische und troposphärische Signalverzögerungen) und des Nutzersegments.

Die wichtigsten Qualitätsanforderungen sind wie folgt festgelegt (GPS-SPS 2008):

Verfügbarkeit

Wahrscheinlichkeit von 98%, dass mindestens 21 der 24 Orbitpositionen mit Satelliten besetzt sind, die ein »gesundes« Signal aussenden; Wahrscheinlichkeit von 99,999%, dass mindestens 20 der 24 Orbitpositionen mit Satelliten besetzt sind, die ein »gesundes« Signal aussenden. Dies führt zu Wahrscheinlichkeiten für das *Position*

Dilution of Precision (PDOP) von 6 oder geringer von 98% im globalem Durchschnitt und 88% für den schlechtesten Ort (5° Elevationsmaske).

Genauigkeit

Der *User Range Error* (URE – die (Un-)Genauigkeit der Pseudoentfernung aufgrund von Einflüssen des Kontroll- und Satellitensegments) beträgt im globalen Mittel mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% weniger als 12,8 m; im schlechtesten Einzelfall soll sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,79% die 30 m nicht übersteigen. Im Zusammenhang mit den erwähnten PDOP-Werten führt dies zu horizontalen/vertikalen Positionsabweichungen von weniger als 9 m/15 m (95%) im globalen Durchschnitt und am schlechtesten Ort von weniger als 17 m/37 m (95%) für eine Elevationsmaske von 5°.

Integrität

Treten Anomalien bei einem ausgesendeten Signal auf, so kann das GPS-Kontrollsegment auf zwei Arten reagieren. Zum einen kann es den Wert der *User Range Accuracy* (URA), den der Nutzer mitgeteilt bekommt, so erhöhen, dass das Signal innerhalb der so geänderten Spezifikationen liegt. Andererseits kann es den Satelliten »ungesund« setzen, um mitzuteilen, dass die Signale nicht genutzt werden sollen. Eine Verletzung der Integrität liegt nur dann vor, wenn der tatsächliche URE den 4,42-fachen Wert der ausgesendeten URA übersteigt. Die Zeitgrenze bis zu einer Mitteilung der Spezifikationsüberschreitung an den Nutzer liegt bei einigen Sekunden, was sehr wenig ist, wenn man berücksichtigt, dass nach den ursprünglichen GPS-Konzepten keine kontinuierliche Kommunikationsverbindung zwischen Kontrollsegment und GPS-Satelliten bestehen müsste. GPS behält sich im Durchschnitt drei Integritätsverluste pro Jahr vor.

Um eine höhere Integrität bei besserer Genauigkeit zu erzielen, sind die SBAS (WAAS, EGNOS, etc.) als Ergänzungssysteme in Betrieb genommen worden. Sie betreiben kontinentale Netze von Referenzstationen am Boden, um dem Einfrequenz-C/A-Code-Nutzer Signalkorrekturen zur Genauigkeitssteigerung und weitere Informationen zur Integritätssteigerung zu liefern. Die Datenübermittlung zum Nutzer erfolgt über geostationäre Satelliten, sodass kontinuierlich eine Kommunikationsverbindung Bodensegment – geostationärer Satellit – Nutzer bestehen kann, die eine schnelle Übermittlung der Integritätsinformationen ermöglicht.

6.2 DGPS-Dienst der WSV

Der DGPS-Dienst der deutschen Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) sendet wie weltweit hunderte weitere DGPS-Referenzstationen Einfrequenz-Codekorrekturen entsprechend einer Empfehlung der IALA (*International*

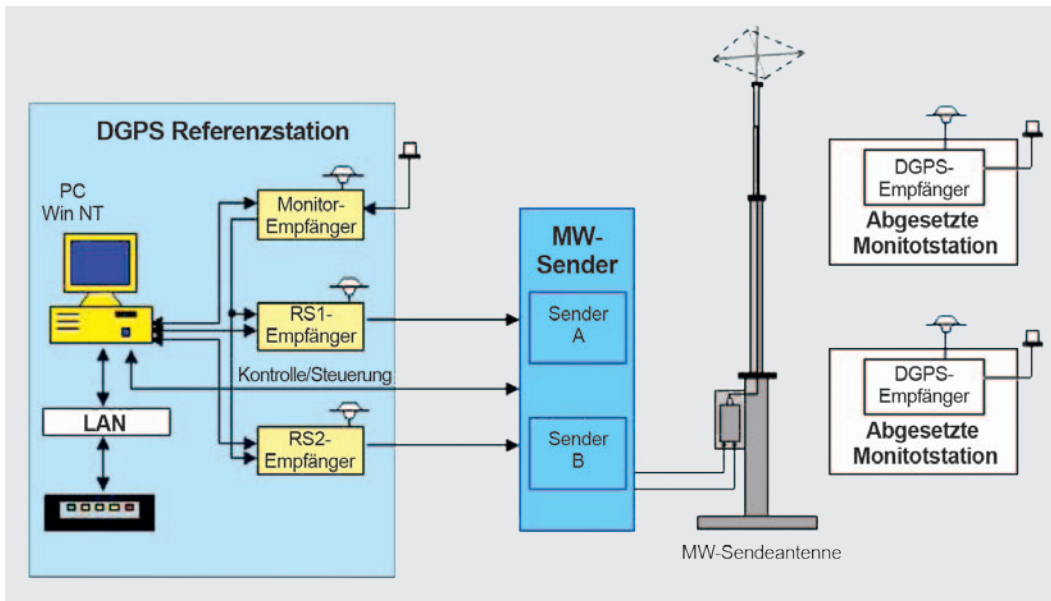


Abb. 3: Aufbau einer DGPS-Referenzstation der WSV (nach Hoppe 2007)

Association of Lighthouse Authorities) aus. Neben der Steigerung der Genauigkeit ist insbesondere die Aussendung von Integritätsinformationen das Ziel dieser Art von Referenzstationen. Detailinformationen zu diesem DGPS-Dienst finden sich unter www.wsv.de/fvt/dgps.

An dieser Stelle soll nur auf den Aufbau der DGPS-Referenzstationen eingegangen werden, der exemplarisch zeigt, wie mit Redundanzen in der Ausrüstung und mit zusätzlichen Monitorstationen eine durchgreifende Qualitätssicherung eines solchen Dienstes erreicht werden kann (Abb. 3). Zu einer solchen DGPS-Station gehören:

- zwei redundante Referenzstationsempfangsausrüstungen mit je einem Mittelwellensender,
- ein Steuerungs- und Überwachungs-PC,
- eine Mittelwellen-Sendeantenne,
- eine Monitorstation vor Ort, die die Inhalte der ausgesendeten Signale überprüft sowie
- zwei abgesetzte Monitorstationen, die insbesondere die Signalverfügbarkeit überwachen, die z.B. witterungsbedingt und z.T. auch nur regional eingeschränkt sein kann.

Folgende Anforderungen sollen mit diesem Stationsaufbau erfüllt werden: horizontale Positionsgenauigkeiten von besser als 5 m (Konfidenzniveau 95%), Integritätsalarmgrenzen von weniger als 10 Sekunden bei einer Dienstverfügbarkeit von 99,8%.

6.3 International GNSS Service (IGS)

Zum *International GNSS Service* (IGS, <http://igsb.jpl.nasa.gov/>) tragen weltweit über 200 Forschungsorganisationen bei, die zum einen augenblicklich etwa 370 permanente GNSS-Referenzstationen betreiben und zum anderen Produkte generieren, zu denen u.a. präzise Satellitenorbits und präzise Satellitenuhrkorrekturen ge-

hören. Diese Produkte werden in zehn *Analysis Centers* (AC) erzeugt und durch den *Analysis Center Coordinator* (ACC), augenblicklich der National Geodetic Survey (NGS) in Silver Spring, Maryland, USA, zu den eigentlichen IGS-Produkten zusammengefasst.

Zur Sicherung der Qualität der IGS-Produkte werden u. a. folgende Maßnahmen durchgeführt:

- IGS-Stationen müssen Minimalstandards einhalten, zu denen Anforderungen an die Stationsumgebung, den verwendeten Empfänger, die verwendete Antenne, Datenübertragung und -sicherung und langfristige Stabilität und Nutzungsmöglichkeit gehören (*IGS Site Guidelines*, <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.html>).
- Besonders hohe Anforderungen werden an die Untergruppe der Stationen gestellt, die den IGS-Referenzrahmen bilden. Dies sind augenblicklich etwa 130 Stationen. Hier spielt insbesondere die langfristige Stabilität und hohe Qualität der gesammelten Beobachtungen eine Rolle.
- IGS-Produkte ergeben sich als gewichtetes Mittel der AC-Produkte. Mindestens drei ACs müssen Produkte gleichen Typs geliefert haben, damit ein IGS-Produkt erzeugt werden kann. Die Kombination der Einzelprodukte soll die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Produkte erhöhen. Dies setzt voraus, dass die ACs die Datenauswertung möglichst unabhängig (z.B. mit unterschiedlicher Software) durchführen. Hier ist anzumerken, dass aber weitgehend mit denselben Beobachtungsdaten und – unvermeidbar – vielfach mit denselben Auswertemodellen gearbeitet wird.
- Die IGS-Produkte werden auf die Beobachtungsdaten der Stationen, die den IGS-Referenzrahmen bilden, angewandt, indem Positionslösungen mit dem PPP-Verfahren (*Precise Point Positioning*) berechnet werden. Dies dient einerseits der Kontrolle der IGS-Produkte und andererseits der Kontrolle der Beobachtungsdaten

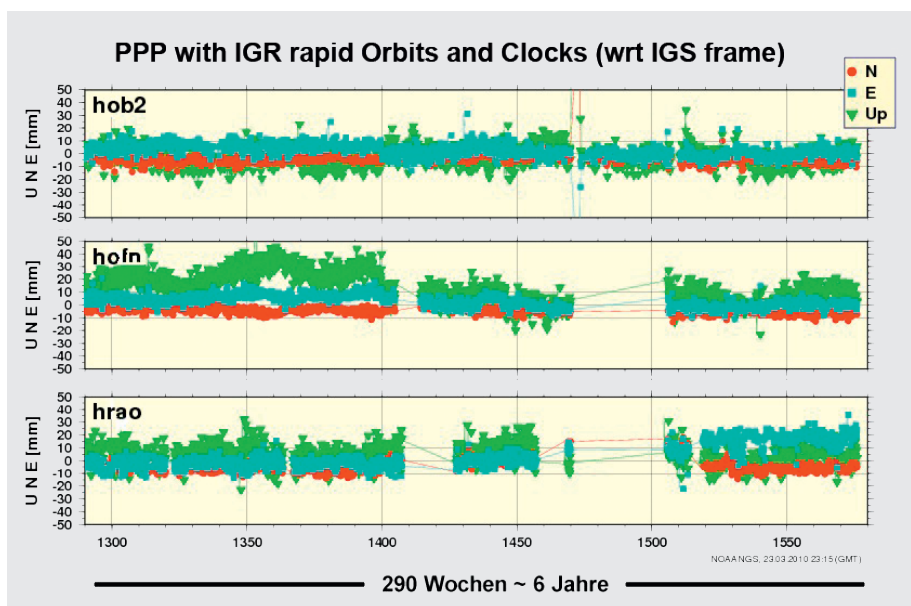


Abb. 4:
Beispiel für PPP-Positionsergebnisse auf der Basis von IGS rapid-Produkten
(Quelle: http://acc.igs.org/index_igsacc_ppp.html)

der einzelnen Stationen. Die Ergebnisse werden im Internet veröffentlicht (http://acc.igs.org/index_igsacc_ppp.html). Ein Beispiel ist in Abb. 4 dargestellt.

Das IGS hat keine Qualitätsanforderungen an seine Produkte aufgestellt. Es liefert so genaue Ergebnisse wie möglich: z. B. GPS und GLONASS-Orbits nach 12 bis 18 Tagen mit wenigen cm Genauigkeit (dreidimensional, Konfidenzniveau 68 %) und GPS Satellitenuhren mit einer Genauigkeit von 75 ps ($\sim 2...3$ cm, 68 %). Aussagen über die tatsächliche Verfügbarkeit innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens liegen nicht vor, ebenso wenig Angaben über die Integrität dieser Daten.

6.4 SAPOS-HEPS/GPPS

Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) liefert in seinem Hochpräzisen Echtzeit-Positionierungsservice (HEPS) referenzstationsnetz-basierte Beobachtungskorrekturen für Genauigkeiten von 2 cm (Konfidenzniveau 68 %) horizontal und 2 bis 4 cm (68 %) vertikal. Dieselben Beobachtungsdaten werden im Geodätischen *Post-Processing* Positionierungsservice (GPPS) abgegeben, wobei dann bei entsprechend langer Beobachtungsdauer auf Nutzerseite 1 cm-genaue (68 %) horizontale und vertikale Koordinaten erzeugt werden können. Alle genannten Positionsgenauigkeiten können nur für ideale Signalempfangsbedingungen auf Nutzerseite gelten.

Um die genannten hohen Genauigkeiten erzielen zu können, werden Qualitätssicherungsmaßnahmen auf mehreren Ebenen durchgeführt. Dazu gehören:

- Die Einhaltung von Mindestbedingungen auf Referenzstationsseite (Heckmann und Jahn 2009): Betrieb von geodätischen Zweifrequenzempfängern mit geodätischen Antennen, für die absolute individuelle An-

tennenkalibrierergebnisse vorliegen; kontinuierliche, flächendeckende, hochgenaue, schnelle und zuverlässige Datenverfügbarkeit.

- Die Einhaltung von Mindestbedingungen auf Seiten der Rechenzentrale (Heckmann und Jahn 2009): Fehlermodellierung für Netz-RTK (HEPS) durch qualitativ hochwertige Software; Bedienung einer hohen Anzahl von Nutzern im Parallelbetrieb.
- Echtzeitmonitorstationen: In einzelnen Bundesländern werden Echtzeitmonitorstationen betrieben, an denen mithilfe der HEPS-Datenströme bis zu 40 Mehrdeutigkeitslösungsversuche pro Stunde durchgeführt werden. Die notwendigen Initialisierungszeiten und die Abweichungen von den Sollkoordinaten lassen wichtige Rückschlüsse auf die Genauigkeit der HEPS-Daten zu. Weiterhin wird die Verfügbarkeit der HEPS-Datenströme kontrolliert (siehe auch: <http://sapos.bayern.de/NetworkPerformance>).
- Der Einfluss der Ionosphäre, der entscheidend sein kann für die erfolgreiche Durchführung von Netz-RTK-Positionsbestimmungen, wird kontinuierlich im Referenzstationsnetz überprüft. Die Ergebnisse stehen den Nutzern z. B. in grafischer Darstellung der leicht zu interpretierenden I_{95} -Index-Werte im Internet zur Verfügung (z. B. www.lgnapp.niedersachsen.de/sapos/iono_index.htm). Treten beim Feldeinsatz Probleme auf, so kann hier überprüft werden, ob dafür das Auftreten ionosphärischer Störungen als Ursache in Frage kommt. Zwar ist die Stärke der Störungen durch den Dienstanbieter nicht beeinflussbar, aber diese Störungsinformationen sind ein wichtiges Qualitätskriterium für die gesendeten Datenströme.
- Die fortlaufende Qualitätsanalyse der Beobachtungsdaten, Datenströme und des Nutzerverhaltens nach folgenden Kriterien (Rubach 2010):
 - Die Phasenmehrwegeanalyse der Referenzstationen dient der Erkennung von Stationen mit weniger guten Beobachtungsdaten (Beispiel in Abb. 5).

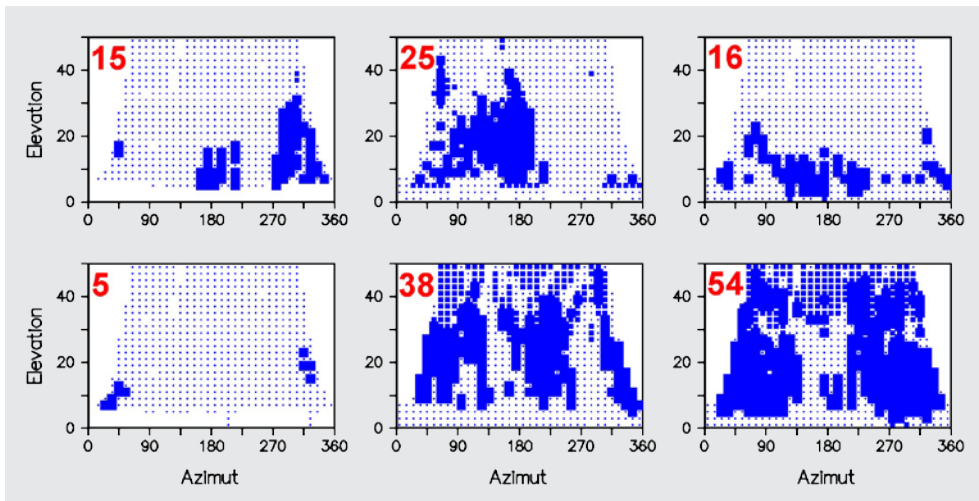


Abb. 5: Phasenmehrwegeuntersuchungsergebnisse von sechs SAPOS-Referenzstationen, die mit Choke-Ring-Antennen ausgestattet sind. Legende: Einzelpunkte: Messdaten vorhanden aber keine Mehrwegeeffekte detektiert, Farbflächen: Mehrwegeeffekte detektiert, Zahlen jeweils oben links: zugehörige Mehrwegeindexwerte.

- Mit der Koordinatenüberwachung der Referenzstationen werden Koordinatenveränderungen detektiert (Beispiel in Abb. 6).
- Die Verfügbarkeit der Echtzeit-Datenströme stellt die HEPS-Verfügbarkeit dar.
- Die Verfügbarkeit der RINEX-Daten stellt die GPPS-Verfügbarkeit dar.
- Die Zeitdauer bis zur Phasenmehrdeutigkeitslösung auf Nutzerseite (*Time to Fix Ambiguities* – TTFA) liegt in der Rechenzentrale aufgrund der Rückmeldungen der HEPS-Nutzer vor und erlaubt eine Überwachung der Korrektheit der Datenströme und der Genauigkeit der HEPS-Daten sowie ein Gesamtanalyse der HEPS-Qualität.
- Der Nutzungsumfang spiegelt die Akzeptanz des Dienstes auf Nutzerseite wider.

7 Qualitätssicherung auf Nutzerseite

Neben Qualitätssicherungsmaßnahmen auf Dienstseite hat natürlich auch der Nutzer selbst Möglichkeiten, seine Ergebnisse zu kontrollieren und ihre Zuverlässigkeit zu steigern. Auch hier spielen wieder zusätzliche, redundante Messungen eine entscheidende Rolle.

Bei Navigationsanwendungen (Einfrequenz, Codemessungen), insbesondere bei Fluganwendungen, spielen sogenannte *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM)-Algorithmen eine besondere Rolle, die insbesondere dann eingesetzt werden, wenn die Positionsbestimmung ausschließlich auf GNSS beruht (Kaplan und Hegarty 2006, Hewitson und Wang 2006). Dabei werden redundante Beobachtungen in einzelnen Messepochen genutzt, um entweder eine fehlerbehaftete Koordinatenbestimmung zu detektieren (fünf Codemessungen) oder sogar eine grob fehlerbehaftete Messung zu identifizieren und auszuschließen (sechs und mehr Codemessungen). Grobe Fehler können hierbei sowohl in der Messung selbst (im Empfänger) oder in den Satellitenkoordinaten und Satellitenuhrkorrekturen aufgetreten sein. Ein Ergebnis des RAIM-Algorithmus sind horizontale/vertikale Konfidenzbereiche (*Horizontal/Vertical Protection Levels: HPL/VPL*) für die berechnete Position. Eine Weiterentwicklung der RAIM-Algorithmen für phasenbasierte Positionsbestimmungen wäre wünschenswert.

Für cm-genaue Positionsbestimmung und geodätische Anwendungen sollen hier zwei Verfahren angesprochen werden, die in der geodätischen Praxis unbedingt angewendet werden sollten und vielfach tatsächlich seit Jahren angewendet werden.

Das erste ist ein Prüfverfahren, welches insbesondere bei Netz-RTK-Einsatz (oder auch bei RTK oder kurzzeitstatischen Anwendungen, vgl. Tab. 1) sinnvoll ist. Hierfür werden nach exakt der Methode, die später zur Neupunktbestimmung zum Einsatz kommen soll, auf einem oder mehreren koordinatenmäßig bekannten Punkten Positionsbestimmungen durchgeführt (Fuhlbrügge 2004,

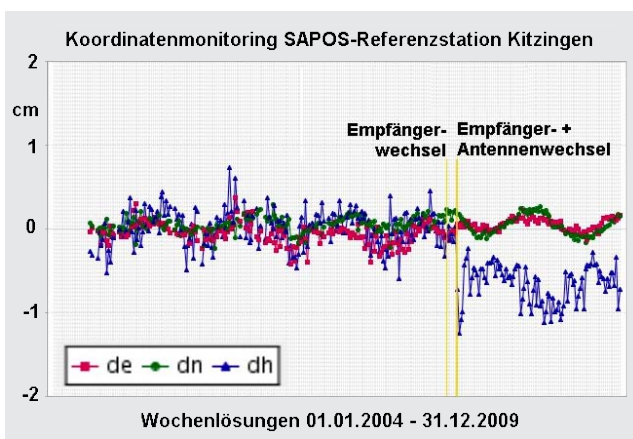


Abb. 6: Langzeit-Koordinatenüberwachung einer SAPOS-Referenzstation, wobei zu erkennen sind: jahreszeitlich-periodische Variationen der horizontalen Koordinatenkomponenten, Unstetigkeit der Höhenkoordinate bei einem Antennenwechsel (nach <http://sapos.bayern.de/>).

Heister 2006). Die Prüfung erfolgt auf Koordinatenebene, d.h. durch Vergleich der bestimmten Koordinaten mit ihren Sollwerten. Die Sollkoordinaten stammen dabei meist aus langzeit-statischen GNSS-Beobachtungen. Die Differenzen dürfen vorgegebene Grenzwerte (bei RTK z.B. 1 cm horizontal und 3 cm vertikal) nicht übersteigen. Mit dieser Prozedur wird das Gesamtmesssystem geprüft, also u.a.:

- die Funktionstüchtigkeit des GNSS-Empfängers und der Antenne,
- die Empfangbarkeit und Korrektheit von Datenströmen der verwendeten GNSS-Dienste,
- Auswertesoftwareeinstellungen u.a. zur Berücksichtigung von Antennenkorrekturen und Koordinatentransformationen,
- die korrekte Handhabung der GNSS-Ausrüstung u.a. in Bezug auf Zentrierung und Antennenhöhenmessung.

Bei größeren Abweichungen muss eine genaue Analyse der Ursachen erfolgen.

Die zweite Methode ist die »doppelte Punktbestimmung«. Grundidee ist, durch eine unabhängige (!) Doppelbestimmung der Punktkoordinaten und somit einer Überprüfung auf Koordinatenebene die Zuverlässigkeit des Resultates zu erhöhen (Auerswald u.a. 2000, Lienhart u.a. 2003). Eine unabhängige Zweitbestimmung sollte sich idealerweise in folgenden Punkten von der Erstbestimmung unterscheiden: Messverfahren, Messausrüstung (Instrumente und Auswertesoftware), Umweltbedingungen, Beobachter, verwendete GNSS-Dienste, etc. Es ist offensichtlich, dass hier in der Praxis Kompromisse eingegangen werden müssen. Diese reichen im Allgemeinen so weit, dass mit demselben Messverfahren (GNSS), derselben Messausrüstung, meist mit demselben Beobachter und unter Verwendung derselben GNSS-Dienste gearbeitet wird. Trotzdem erfüllt diese Doppelbestimmung noch einen großen Teil ihres Zweckes, wenn beim Arbeiten mit Stativ dieses neu aufgebaut (Zentrierung, Antennenhöhenmessung) wird und eine Neuinitialisierung der Mehrdeutigkeitslösung durchgeführt wird.

Strittig ist häufig der zeitlich notwendige Abstand zwischen Erst- und Zweitbestimmung. Selbst wenn beide Bestimmungen zeitlich direkt hintereinander durchgeführt werden, ist die Kontrollwirkung immer noch hoch. Sie lässt sich noch etwas steigern, wenn ein zeitlicher Mindestabstand von 30...60 Minuten eingehalten wird (Änderung der Satellitengeometrie und -konstellation). Dann stellt sich aber umso mehr die Frage der Wirtschaftlichkeit dieses zusätzlichen Messaufwandes.

8 Schlußfolgerung

Eine (geodätische) Positionsbestimmung mit GNSS ist heute vielfach gleich auf mehrere Dienste angewiesen. Diese sind bemüht, ihre Produkte, nämlich Signale und Dateninhalte, im Hinblick auf die jeweiligen typischen Nutzer-Qualitätsanforderung, insbesondere Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität, zu kontrollieren und zu optimieren. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzerinteressen und auch angewendeten GNSS-Messverfahren fallen die Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei den einzelnen Diensten sehr unterschiedlich aus. Diese Unterschiede sind insbesondere im Vergleich von Diensten für Navigationsanwendungen und Diensten für geodätische Anwendungen erkennbar. Beide Arten von Diensten können in Bezug auf die Qualitätssicherung von der jeweiligen anderen Art eines GNSS-Dienstes lernen.

Literatur

- Auerswald, F.; Bilajbegovic, A.; Vierus, M.: Feldanwendung der RTK-Technologie bei Verwendung vernetzter Referenzstationen mit kurzem historischen Rückblick. AVN, 107:270-280, 2000.
- Fuhlbrügge, H.-J.: Untersuchungen zur Prüfung von GPS-Echtzeitsystemen als Beitrag zur Qualitätssicherung im Vermessungswesen. Dissertation, Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nr. 91, 2004.
- Görres, B.: Ist das GNSS-Antennenproblem gelöst? zfv, 135:256-267, 2010.
- GPS-SPS: Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. 4. Auflage, 2008: www.navcen.uscg.gov/GPS/geninfo/2008SPSPPerformanceStandardFINAL.pdf.
- Heckmann, B.; Jahn, C.-H.: Geodätischer Raumbezug. In: Kummer, K.; Frankenberger, J. (Hg.): Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen, Wichmann-Verlag, Heidelberg, 203-257, 2009.
- Hewitson, S.; Wang, J.: GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) Performance Analysis. GPS Solutions, 10:155-170, 2006.
- Heister, H.: Systemprüfung von GPS-Empfangssystemen. AVN 113:162-168, 2006.
- Hoppe, M.: MW-DGPS-Referenzsystem nach IALA-Standard an der deutschen Küste. Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken, 04.01.2007.
- IS-GPS-200: Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces. Revision D, 2006: www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo/IS-GPS-200D.pdf.
- Kaplan, E.D.; Hegarty, C.J. (Hg.): Understanding GPS - Principles and Applications. 2. Auflage, Artech House, Boston, 2006.
- Lienhart, W.; Wieser, A.; Brunner, F.K.: Ausreißerdetektion bei der Positionsbestimmung in aktiven GPS Netzen. AVN, 110:177-182, 2003.
- Rubach, J.: Persönliche Informationen, 2010.
- Wanninger, L.; Wallstab-Freitag, S.: Auswertung von GLONASS-Trägerphasenbeobachtungen. zfv, 132:292-297, 2007.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr.-Ing. Lambert Wanninger
Geodätisches Institut, TU Dresden
01062 Dresden
lambert.wanninger@tu-dresden.de