

Permanente GPS-Stationen als Referenz für präzise kinematische Positionierung

LAMBERT WANNINGER, Neuwied

Keywords: GPS, reference station, kinematic positioning, observation interpolation, virtual reference station

Zusammenfassung: Die beim Einsatz permanenter GPS-Referenzstationen für präzise kinematische Positionierung auftretenden Probleme werden beschrieben und Lösungen vorgestellt. Dazu gehören die zeitliche Verdichtung von Referenzstationsbeobachtungen und die Positionierung im Netz von Stationen mit Hilfe einer semikinematischen virtuellen Referenzstation.

Summary: *Continuously Operating GPS Reference Stations for Precise Kinematic Positioning.* The paper describes difficulties encountered using continuously operating GPS reference stations for precise kinematic positioning and shows how to resolve these problems. This includes the production of high-rate reference observations by interpolation and the positioning in a network of reference stations using a semi-kinematic virtual reference station.

Einleitung

GPS ist heutzutage bei der präzisen Positionierung Flugzeug-getragener Sensoren wie Luftbildkamera oder Laserscanner unverzichtbar. Um die für viele Anwendungen erforderlichen Positionierungsgenauigkeiten auf Dezimeter- oder sogar Zentimeterniveau zu erreichen, müssen GPS-Referenzstationen am Boden betrieben werden. Durch die schnell zunehmende Ausbreitung permanenter GPS-Referenzstationen besteht immer mehr die Möglichkeit, dabei auf den Betrieb zusätzlicher temporärer Referenzstationen zu verzichten. Dabei spielen die zeitliche Verdichtung der Referenzbeobachtungen und die Positionierung im Netz von Referenzstationen eine wichtige Rolle.

Permanente GPS-Referenzstationen in Europa

Weltweit sind seit 1992 permanent betriebene GPS-Stationen im Aufbau, die Referenz-

daten für präzise Positionierung und auch für andere Aufgabenstellungen bereitstellen. Augenblicklich (März 2003) existieren in Europa etwa 650 permanente Stationen, deren Daten für *Post-Processing*-Anwendungen erhältlich sind. Die in Abb. 1 dargestellten Stationen wurden anhand der im Internet verfügbaren Informationen zusammengetragen. Da es eine unüberschaubare Anzahl von Stationsbetreibern gibt, ist die Darstellung sicherlich nicht vollständig.

Auf allen diesen Referenzstationen werden hochwertige Zweifrequenz-Empfänger betrieben und geodätische Antennen eingesetzt. Die meisten Stationen sind reine GPS-Stationen, auf einigen werden kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger eingesetzt. Im Allgemeinen liegen Stationskoordinaten im ITRF 2000 oder ETRS 89 vor. Die Daten werden im RINEX-Datenformat (GURTNER 2002) gespeichert. Es existiert eine Reihe weiterer Stationen, die nur für den Echtzeitbetrieb arbeiten, also ihre Referenzdaten aussenden, ohne sie für nachträgliche Nut-



Abb. 1: Permanente GPS-Referenzstationen in Europa, deren Beobachtungsdaten für nachträgliche Nutzung zur Verfügung stehen (Stand März 2003).

zung abzuspeichern oder zur Verfügung zu stellen. Solche Stationen wurden in Abb. 1 nicht aufgenommen.

Betreiber der Stationen sind Forschungseinrichtungen, nationale Landesvermessungsämter oder private Firmen. Die Daten vieler dieser Stationen werden dem Nutzer kostenlos zur Verfügung gestellt. Dies gilt insbesondere für die im Rahmen internationaler Forschungsk Kooperationen gesammelten Daten des *International GPS Service* (IGS 2003), des *International GLONASS Service Pilot Project* (IGLOS 2003), für den kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger betrieben werden, und des *EUREF Permanent Network* (EPN 2003) und zum Teil auch für Referenzdaten nationaler Landesvermessungsämter.

Der Rückgriff auf Referenzdaten von permanenten GPS-Stationen ermöglicht den Verzicht auf den Betrieb eigener temporärer Referenzstationen für die Dauer einer Messkampagne. Die Kosten für den Einkauf von Referenzdaten liegen in jedem Fall weit unter den Kosten für den Betrieb einer eigenen Station. Die Betreiber permanenter Stationen geben aber keine Garantie, dass ihre Stationen tatsächlich in jedem Zeitraum

Referenzdaten liefern. Zwar ist die Verfügbarkeit der Referenzstationsdaten im allgemeinen sehr hoch, aber es existieren große Unterschiede zwischen einzelnen Stationen bzw. Stationsbetreibern. In einigen Teilen Europas sind die Netze dicht genug, um im Falle eines Stationsausfalls auf die Daten einer benachbarten Station zurückgreifen zu können.

Die größte Dichte von permanenten Referenzstationen findet sich in einigen Staaten Zentraleuropas. Der Stationsabstand beträgt hier zum Teil nur 20 bis 50 km. Zielsetzung ist es hier, zentimeter-genaue Positionierung mit sehr kurzen Beobachtungszeiten zu ermöglichen. Wie die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, ist dafür ein Referenzstationsabstand von 50 km vollkommen ausreichend, wenn die Positionierung im Referenzstationsnetz und nicht nur in Bezug auf eine einzelne Referenzstation durchgeführt wird. Zu diesem Zweck werden die Beobachtungsdaten des Referenzstationsnetzes vorverarbeitet, es werden präzise Korrekturmodelle der entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse berechnet und ein für den Aufenthaltsort des Nutzers optimaler Referenzdatensatz einer sogenannten virtuellen Referenzstation (VRS) erzeugt (WANNINGER 1999, WÜBBENA et al. 2000, LANDAU 2000).

Für die meisten Referenzstationen werden die Beobachtungsdaten mit einem Epochenabstand von größer als einer Sekunde angeboten. Typische Epochenabstände sind 15 oder 30 Sekunden. Für kinematische Anwendungen sind Beobachtungen der Referenzstation aber mit derselben Häufigkeit notwendig, wie sie im bewegten Empfänger aufgezeichnet werden, also mit einem Epochenabstand von einer Sekunde oder sogar noch dichter. Eine Verringerung des Epochenabstands gelingt ohne bedeutende Genauigkeitsverluste durch zeitliche Interpolation zwischen Referenzstationsbeobachtungen.

Zeitliche Verdichtung von Referenzstationsbeobachtungen

Seit der Abschaltung der künstlichen GPS-Signalverschlechterung durch *Selective*

Availability im Mai 2000 ist die Verdichtung von statischen Referenzbeobachtungen zur Verringerung des Epochenabstands kaum noch mit Genauigkeitsverlusten verbunden. Problemlos können die Beobachtungen statischer Referenzstationen, die z. B. mit einem Epochenabstand von 15 oder 30 Sekunden vorliegen, auf Epochenabstände von einer Sekunde oder weniger als einer Sekunde verdichtet werden, um dann für die Relativauswertung kinematischer Beobachtungsdaten zur Verfügung zu stehen (WANNINGER 2000).

Die Größenordnung der dabei auftretenden Interpolationsfehler soll anhand eines Beispieldatensatzes aufgezeigt werden. Von vier GPS-Empfängern liegen mehrere Stunden Beobachtungsdaten vor, die mit einem Epochenabstand von einer Sekunde aufgezeichnet wurden. Es wurden hierbei statisch betriebene Empfänger gewählt, um Sollkoordinaten zur Verfügung zu haben. Die erzielten Ergebnisse gelten aber genauso für kinematische Anwendungen. Die Basislinienlängen zwischen einer gewählten Referenzstation und den drei weiteren Stationen betragen 7, 98 und 165 km. Um größere Epochenabstände zu simulieren, wurden die Daten der Referenzstationen durch Beobachtungsselektion auf unterschiedliche Intervalle zwischen zwei und 240 Sekunden ausgedünnt. Anschließend wurden die verbliebenen Referenzbeobachtungen durch Interpolation mit Hilfe des Programms WARINEX wieder auf einen Epochenabstand von einer Sekunde verdichtet. Abb. 2 zeigt die räumliche Positionsgenauigkeit von Einzelepochen im Sekundenabstand in Abhän-

gigkeit des ursprünglichen Ausdünnungsintervalls, der Basislinienlänge und der Art der Koordinatenlösung.

Die Ergebnisse der Abb. 2 lassen sich wie folgt interpretieren: Die mit den Originaldaten erzielbare Positionsgenauigkeit ist abhängig von der Basislinienlänge. Je größer der Abstand zwischen den Stationen, umso stärker wirken die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse und umso größer wird die Standardabweichung der 3D-Position. Gelingt die vollständige Zweifrequenz-Mehrdeutigkeitslösung, erzielt man mit der Ionosphären-freien Koordinatenlösung die besten Ergebnisse mit Standardabweichungen von wenigen Zentimetern. Bei längeren Basislinienlängen kann es aber vorkommen, dass nur die Widelan-Mehrdeutigkeitslösungen auf ihre ganzen Werte festgesetzt werden können, so dass dann nur eine Widelan-Koordinatenlösung möglich ist, die verstärkt durch Mehrwegefehler und Ionosphäre beeinflusst wird. Die erzielbaren Positionsgenauigkeiten liegen dann bei diesen statischen Beobachtungen im 10 cm-Niveau.

Verdichtet man nun Referenzbeobachtungen, um den Epochenabstand der kinematischen Beobachtungen zu erhalten, so werden zusätzlich Interpolationsfehler gemacht. Die Ergebnisse in Abb. 2 zeigen aber, dass diese vielfach so gering sind, dass sie keinen Einfluss auf die Koordinatenergebnisse haben. Bis zu einem Ausdünnungsintervall von 10 Sekunden für die kürzeste und 20 Sekunden für die längste Basislinie sind keine signifikanten Verschlechterungen der Koordinatengenauigkeiten nachweisbar.

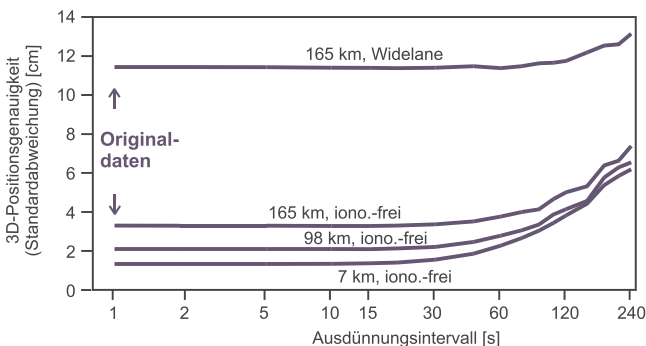


Abb. 2: Dreidimensionale Positionsgenauigkeit von Einzelepochen bei zeitlich verdichteten Referenzbeobachtungen.

Akzeptiert man eine 10-prozentige Genauigkeitsverschlechterung gegenüber der Originallösung, so sind Ausdünnungsintervalle von 20 Sekunden (Ionosphären-freie Koordinatenlösung bei 7 km Basislinienlänge), 30 Sekunden (Iono.-frei bei 98 km), 45 Sekunden (Iono.-frei bei 165 km) bzw. 180 Sekunden (Widelane-Koordinatenlösung bei 165 km) zulässig.

Positionierung in Referenzstationen- netzen

Wie ausgeführt, eignen sich alle permanenten GPS-Referenzstationen auch für die präzise Positionierung kinematischer GPS-Beobachtungen, wie z. B. Fluganwendungen. Optimale Ergebnisse erhält man, wenn nicht nur die nächstgelegene GPS-Station als Referenz verwendet wird, sondern alle umliegenden Referenzstationen als Netz betrachtet und deren Daten vorverarbeitet werden.

Dabei werden im Netz der Referenzstationen präzise Korrekturmodelle für die entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse der Ionosphäre, Troposphäre und GPS-Satellitenorbitfehler geschätzt und zur Erzeugung von virtuellen Referenzdaten verwendet. Für großräumige Anwendungen müssen die Daten der Virtuellen Referenzstation (VRS) folgende Eigenschaften aufweisen: Zum einen muss die VRS der sich zeitlich ändernden Position des bewegten Empfängers folgen, um möglichst dieselben Fehlereinflüsse aufzuweisen, die dann bei relativer Positionierung herausfallen. Zum anderen muss sie sich aber auch auf eine feste Position beziehen, um von den heute üblichen Auswertesoftwarepaketen als Referenzstation akzeptiert zu werden. Eine solche VRS für großräumige kinematische Auswertungen wird als semi-kinematische VRS bezeichnet (WANNINGER 2002).

Am Beispiel des photogrammetrischen Testprojekts Peebles in Schottland sollen die Vorteile der GPS-Positionierung im Netz von Referenzstationen mit Hilfe einer semi-kinematischen VRS im Vergleich zur Positionierung in Bezug auf eine einzelne Referenzstation

aufgezeigt werden. Im Flugzeug wurde das GPS/INS-System AEROcontrol der IGI mbH, Kreuztal verwendet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich aber ausschließlich auf die GPS-Komponente. Als Referenzstationen am Boden wurde auf Stationen des *National GPS Network* des britischen *Ordnance Survey* zurückgegriffen, deren Beobachtungsdaten im Internet zur Verfügung stehen (OS 2003).

Bei Verwendung einer einzelnen Referenzstation zur Auswertung der Peebles-Flugdaten würde man die zentral gelegene Station EDIN (Edinburgh) auswählen (Abb. 3). Die maximale Distanz zum Flugzeug beträgt dann 100 km (Abb. 4). Alternativ könnte man die jeweils nächste Referenzstation verwenden, also den Gesamtflug in mehreren unabhängigen Abschnitten auswerten. Dies erhöht den Aufwand für die Datenorganisation aber beträchtlich. Arbeitet man mit einer semi-kinematischen VRS, so werden alle Referenzstationsdaten des Gebietes (vgl. Abb. 3) gemeinsam vorverarbeitet und ein optimaler Referenzstationsdatensatz erzeugt.

Hierfür wurden mit WaSoft/Virtuell zunächst Näherungskordinaten für die Flugzeug-Trajektorie als Einzelstationspositionierung bestimmt. Für die Beobachtungsdaten der fünf Stationen des Referenzstationsnetzes wurden die Phasenmehrdeutigkeiten vollständig gelöst und anschließend präzise Korrekturmodelle der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse (Ionosphäre, Troposphäre und Orbitfehler) berechnet. Die Referenzdaten der Station EDIN wurden dann mit Hilfe der Korrekturmodelle und der Näherungspositionen des Flugzeuges so verändert, dass Beobachtungsdaten einer semikinematischen VRS entstanden. Als feste Referenzposition der VRS wurden die Koordinaten von EDIN gewählt. Sie hätte aber auch an einem beliebigen anderen Ort am Boden fixiert werden können. Da die Referenzdaten der Bodenstationen mit einem Epochenabstand von nur 15 Sekunden vorlagen, wurden für den folgenden Vergleich Beobachtungen von EDIN und auch der VRS durch zeitliche Interpolation auf eine Sekunde verdichtet.

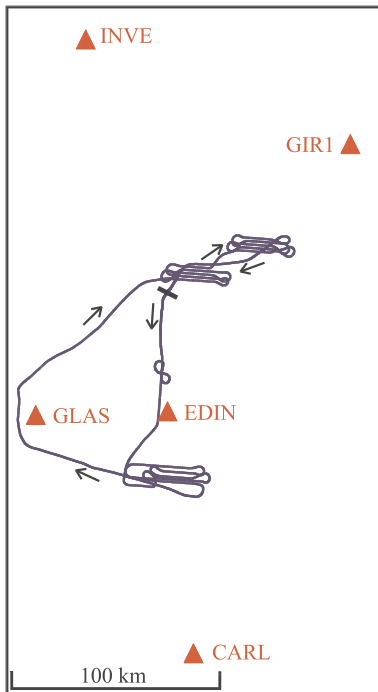


Abb. 3: Permanente GPS-Referenzstationen und Flugtrajektorie im Projekt Peebles.

Ein Qualitätsvergleich der Flugzeug-Positionierung mit Hilfe der einzelnen Referenzstation EDIN und einer semi-kinematischen VRS basierend auf fünf Referenzstationen gelingt über die Betrachtung der Einzelepochen-Residuen. Doppel-Differenz-Residuen der L1-Phasenbeobachtungen und der Ionosphären-freien Linearkombination aus Zweifrequenz-Messungen sind in Abb. 4 dargestellt. Die L1-Residuen werden von ionosphärischen Einflüssen dominiert. Diese können durch Verwendung der semi-kinematischen VRS fast halbiert werden, also die ionosphärisch bedingten Fehler deutlich reduziert werden. Die Restfehler in der Ionosphären-freien Linearkombination ergeben sich insbesondere aus Mehrwegeeffekten sowie troposphärischen und Orbitfehler-Einflüssen. Hier gelingt im Referenzstationsnetz eine Verringerung der horizontalen troposphärischen Einflüsse und auch der Orbitfehler. Da diese aber nur wenig zum Gesamtfehlerhaushalt beitragen, fallen die Verbesserungen hier gering aus.

Die Verwendung der semi-kinematischen VRS verbessert also eine Ionosphären-freie Koordinatenlösung nur wenig. Durch die Verringerung der ionosphärischen Restfehler ermöglicht sie aber eine vollständigere und zuverlässigere Festsetzung der Phasenmehrdigkeiten. Dieser Vorteil kommt bei den vorliegenden Daten kaum zum Tragen, da über die Flugdauer von 3,7 Stunden fast keine Signalabbrüche aufgetreten sind. Bei Bildflügen können diese aber insbesondere in den Kurven zwischen den Bildstreifen kontinuierliche Phasenmessungen verhindern. Um eine solche Situation zu simulieren wurden die Daten des gesamten Fluges in 44 Teilstücke von jeweils 5 Minuten Dauer aufgeteilt. Die Auswertung mit WaSoft/K ergab korrekte Mehrdeutigkeitslösungen bei Verwendung der Referenzstation EDIN in 54 % aller Fälle. Dies konnte bei Verwendung der semi-kinematischen VRS auf 91 % gesteigert werden. Die Verringerung der ionosphärischen Einflüsse führt hier also zu einer deutlichen Verbesserung der Positionierung.

Gelingt die vollständige Zweifrequenz-Mehrdigkeitenlösung nicht, aber zumindest die Festsetzung der Widelane-Mehrdigkeiten, so wird häufig auf eine Widelane-Koordinatenlösung zurückgegriffen, die aber durch ionosphärische Restfehler beeinflusst wird. Im Beispielesatz beträgt die Koordinatengenauigkeit einer Widelane-Lösung (im Vergleich zur Ionosphären-freien Koordinatenlösung) bei Verwendung von EDIN 5,3/6,4/13,0 cm (Standardabweichungen in Nord/Ost/Höhe). Durch Einsatz der semi-kinematischen VRS verringern sich die Werte auf 2,4/3,0/7,8 cm. Die Korrektur der ionosphärischen Fehler im Referenzstationsnetz hat hier also eine deutliche Steigerung der Positionierungsgenauigkeit zur Folge.

Schlussfolgerungen

Die große Anzahl permanenter GPS-Referenzstationen macht in vielen Regionen den Betrieb eigener Referenzstationen überflüssig. Die Beobachtungsdaten der permanenten GPS-Referenzstationen können selbst

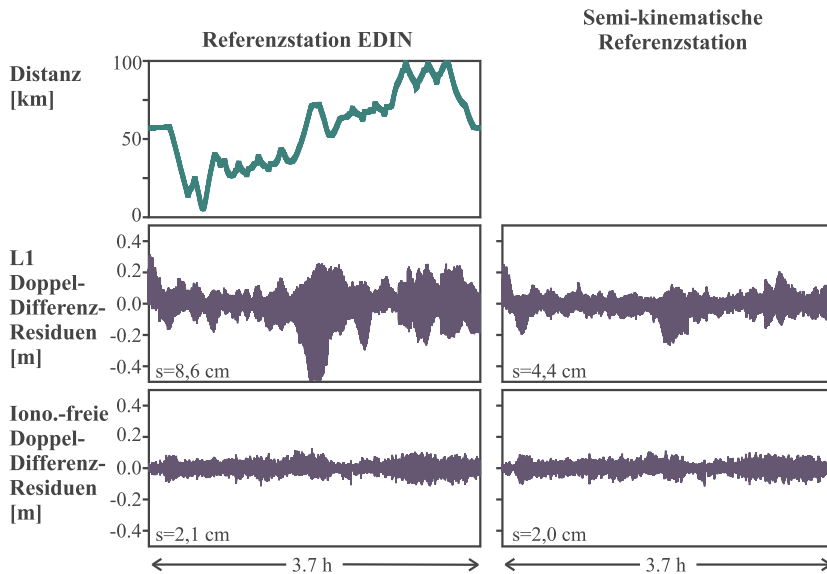


Abb. 4: Vergleich der Basislinienlösungen mit Hilfe der Referenzstation EDIN und der semi-kinematischen VRS: Distanz Referenzstation – Flugzeug, Doppel-Differenz-Residuen für L1 und die Ionosphären-freie Linearkombination.

dann für die präzise Positionierung Flugzeug-getragener Sensoren verwendet werden, wenn sie mit einem großen Messepochenabstand aufgezeichnet wurden. Optimale Positionierungsergebnisse erhält man, wenn die Beobachtungsdaten mehrerer über das Einsatzgebiet verteilter GPS-Stationen vorverarbeitet werden und in der Form einer Virtuellen Referenzstation (VRS) in die Auswertung einfließen.

Literatur und Internetquellen

EPN, 2003: <http://www.epncb.oma.be>

GURTNER, W., 2002: RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10. – Astronomisches Institut, Universität Bern, <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex210.txt>

IGLOS, 2003: <http://igsb.jpl.nasa.gov/projects/iglos/glonass.html>

IGS, 2003: <http://igsb.jpl.nasa.gov/>

LANDAU, H., 2000: Die Implementierung des „virtuellen Referenzstationskonzeptes“ für die RTK-Vermessung mit GPS und GLONASS. – 3. SAPOS-Symposium, 88–89, München 2000. http://www.sapos.de/pdf/3symposium/SAPOS_V11.pdf

OS, 2003: <http://www.gps.gov.uk/>

WANNINGER, L., 1999: Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. Deutsche Geodätische Kommission, Heft C508, München 2000. <http://www.wasoft.de/lit/wanhabil.zip>

WANNINGER, L., 2000: Interpolation von GPS-Beobachtungen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), **107**: 360–363.

WANNINGER, L., 2002: Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning. – Proc. of ION GPS 2002, Portland, Oregon, 1400–1407. <http://www.wasoft.de/lit/ion02f36.pdf>

WÜBBENA, G., BAGGE, A. & SCHMITZ, M., 2000: Referenzstationsnetze und internationale Standards. 3. SAPOS-Symposium, 14–23, München 2000. http://www.sapos.de/pdf/3symposium/SAPOS_V03.pdf

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. LAMBERT WANNINGER
Ingenieurbüro Wanninger
Melsbacher Str. 2, D-56567 Neuwied
Tel./Fax: 02631-951698
e-mail wanninger@wasoft.de
<http://www.wasoft.de>

Manuskript eingereicht: April 2003

Angenommen: Mai 2003