

Permanente GPS-Stationen als Referenz für präzise kinematische Positionierung¹

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 semi-kinematischen 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 flugzeuggetragener 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.

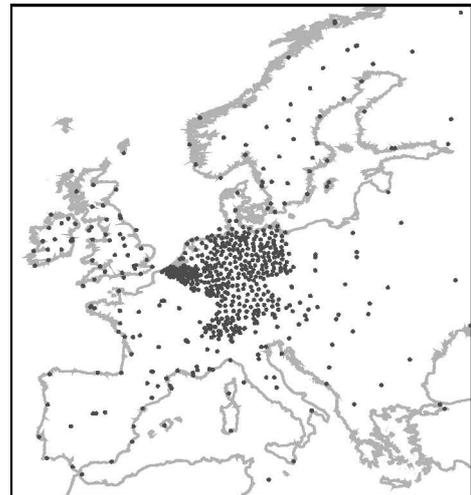
Permanente GPS-Referenzstationen in Europa

Weltweit sind seit 1992 permanent betriebene GPS-Stationen im Aufbau, die Referenzdaten 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 Abbildung 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 2000) gespeichert. Es existiert eine Reihe weiterer Stationen, die nur für den Echtzeitbetrieb arbeiten, also ihre Referenzdaten aussenden, ohne sie für nachträgliche Nutzung abzuspeichern oder zur Verfügung zu stellen. Solche Stationen wurden in Abbildung 1 nicht aufgenommen.

¹ „Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)“, 4/2003, S. 343-348.

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



Betreiber der Stationen sind Forschungseinrichtungen, nationale Landesvermessungen oder private Firmen. Die Daten vieler dieser Stationen werden dem Nutzer kostenlos zur Verfügung gestellt. Dies gilt insbesondere für die im Rahmen internationaler Forschungs Kooperationen gesammelten Daten des *International GPS Service* (IGS, 2003), des *International GLO-NASS 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 Landesvermessungen.

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 Zentral-europas. 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 Jahren 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 der selben 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. Abbildung 2 zeigt die räumliche Positionsgenauigkeit von Einzelepochen im Sekundenabstand in Abhängigkeit des ursprünglichen Ausdünnungsintervalls, der Basislinienlänge und der Art der Koordinatenlösung.

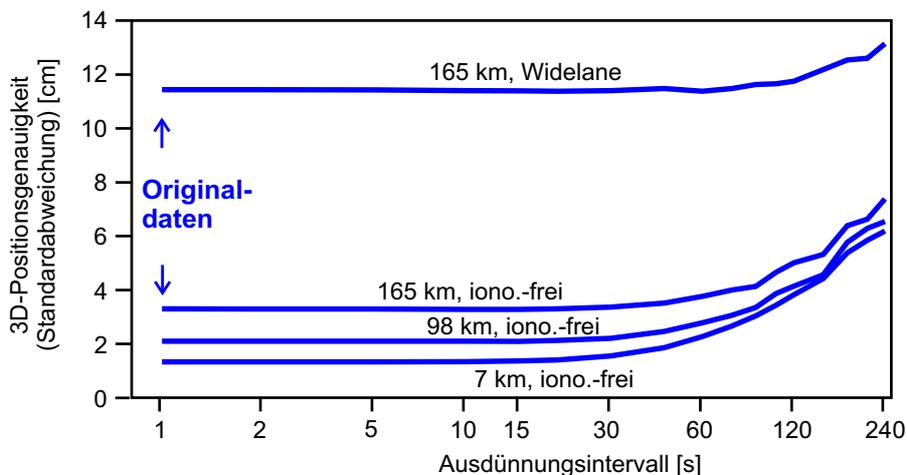


Abb. 2: Dreidimensionale Positionsgenauigkeit von Einzelepochen bei zeitlich verdichteten Referenzbeobachtungen.

Die Ergebnisse der Abbildung 2 lassen sich wie folgt interpretieren. Die mit den Originaldaten erzielbare Positionsgenauigkeit ist abhängig von der Basislinienlänge. Je größer der Abstand zwischen den Stationen, um so stärker wirken die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse und um so 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 Widelane-Mehrdeutigkeiten auf ihre ganzen Werte festgesetzt werden können, so dass dann nur eine Widelane-Koordinatenlösung möglich ist, die verstärkt durch Mehrwegefehler und Ionosphäre beeinflusst wird. Die erzielbaren Positionsgenauigkeiten liegen dann bei diesen statischen Beobachtungen auf dem 10 cm-Niveau.

Verdichtet man nun Referenzbeobachtungen, um den Epochenabstand der kinematischen Beobachtungen zu erhalten, so werden zusätzlich Interpolationsfehler gemacht. Die Ergebnisse in Abbildung 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. 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. Je stärker also andere Fehlereinflüsse wirken, um so größer darf der Epochenabstand der Referenzstationsbeobachtungen gewählt werden, ohne dass die Interpolationsfehler zu einer störenden Genauigkeitsverschlechterung führen.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass es keinen Sinn macht, Referenzstationsbeobachtungen mit einem Epochenabstand von unter fünf Sekunden aufzuzeichnen. Häufigere Beobachtungen enthalten keine zusätzlichen Informationen mehr. Differenzen zwischen interpolierten Beobachtungen und Originalbeobachtungen im 1-Sekunden-Abstand liegen dann auf dem Niveau des Phasenmessrauschens.

Die Untersuchungen zur zeitlichen Beobachtungsinterpolation zeigen, dass alle Beobachtungsdaten permanenter GPS-Stationen als Referenz für präzise kinematische Positionierung geeignet sind, selbst wenn sie nur mit einem Aufzeichnungsintervall von 15 oder 30 Sekunden archiviert wurden.

Positionierung in Referenzstationsnetzen

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.

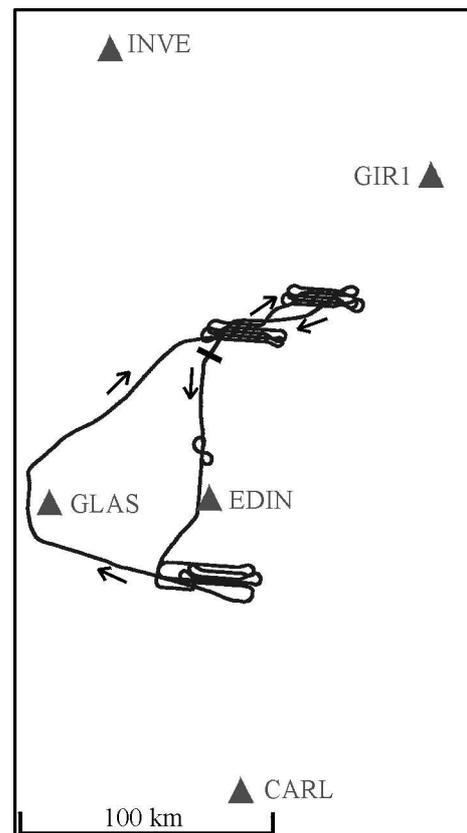
Dabei werden im Netz der Referenzstationen präzisen Korrekturmodelle für die entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse der Ionosphäre, Troposphäre und GPS-Satellitenorbitfehler geschätzt und zur Erzeugung von virtuellen Referenzdaten verwendet. Für großräumige Anwendungen müssen die Daten der Virtuellen Referenzstation (VRS) folgende Eigenschaften aufweisen: Zum einen muss die VRS der sich zeitlich ändernden Position des bewegten Empfängers folgen, um möglichst die selben 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 Näherungskoodinaten für die Flugzeugtrajektorie 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 semi-kinematischen 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 Flugzeugpositionierung 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-Phasen-

beobachtungen und der ionosphären-freien Linearkombination aus Zweifrequenz-Messungen sind in Abbildung 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.

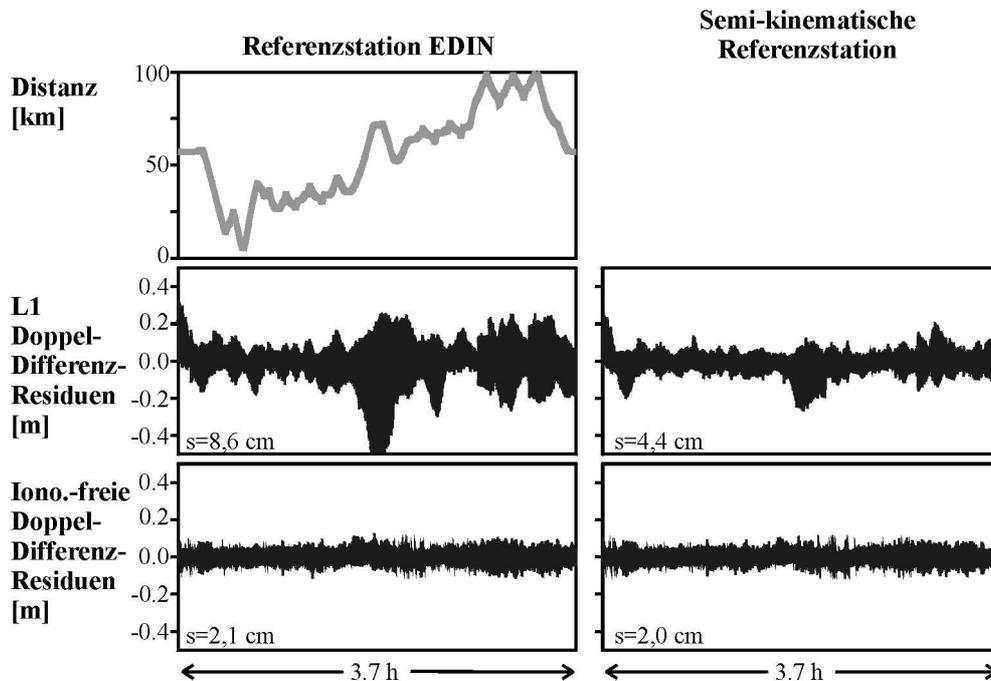


Abb. 4: Vergleich der Basislinienlösungen mit Hilfe der Referenzstation EDIN und der semi-kinematischen VRS: Distanz Referenzstation – Flugzeug, Doppel-Differenz-Residuen für L1 und die ionosphären-freie Linearkombination.

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 Phasenmehrdeutigkeiten. 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 eine 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-Mehrdeutigkeitslösung nicht, aber zumindest die Festsetzung der Widelane-Mehrdeutigkeiten, so wird häufig auf eine Widelane-Koordinatenlösung zurückgegriffen, die aber durch ionosphärische Restfehler beeinflusst wird. Im Beispieldatensatz 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 Refe-

renzstationsnetz 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 dann für die präzise Positionierung flugzeuggetragener 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 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://igsjb.jpl.nasa.gov/igsjb/data/format/rinex210.txt>
- IGLOS, 2003: <http://igsjb.jpl.nasa.gov/projects/iglos/glonass.html>
- IGS, 2003: <http://igsjb.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 Vermessungsnachrichten (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

Dr.-Ing. Lambert Wanninger
Ingenieurbüro Wanninger
Melsbacher Str. 2
56567 Neuwied

Tel./Fax: 02631/951698

wanninger@wasoft.de
<http://www.wasoft.de>