

Zu jeder Zeit an jedem Ort – Studie zur Verfügbarkeit und Genauigkeit von GPS-Echtzeitmessungen im SAPOS-Service HEPS

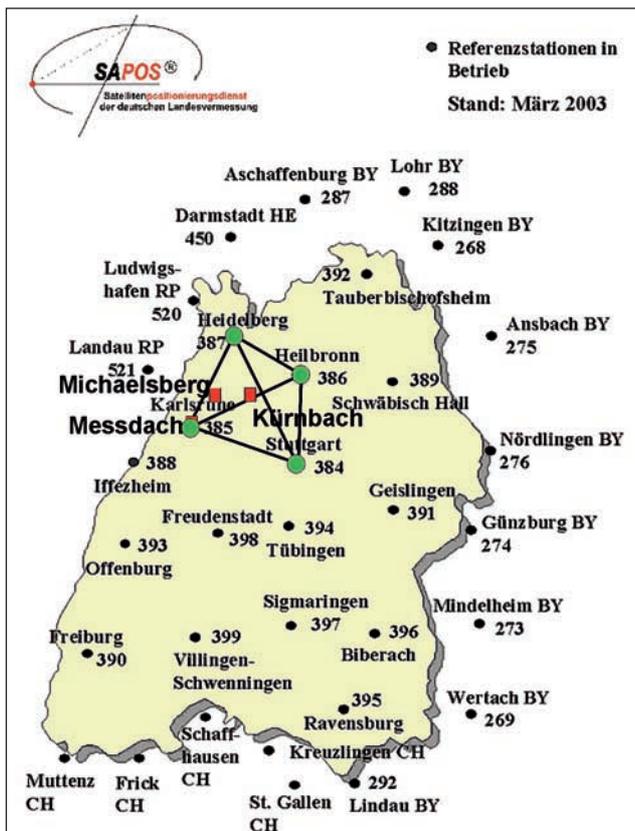
Kurt Seitz, Marcio José Urakawa, Bernhard Heck und Claudia Krueger

Zusammenfassung

Auf der Grundlage einer umfangreichen Studie wird die Verfügbarkeit und Genauigkeit des SAPOS-Echtzeitdienstes HEPS mit den Vernetzungsvarianten FKP und VRS untersucht. Als Parameter für die Verfügbarkeit dienen einerseits die Einwahlzeiten (TTC) mit GSM in die SAPOS-Zentrale Baden-Württemberg in Karlsruhe, andererseits die benötigte Zeit zum Lösen der Phasenmehrdeutigkeiten (TTFA). Aussagen zu der mit der verwendeten GPS-Ausrüstung SR530 der Firma Leica erreichten Genauigkeit werden bezüglich des Abstandes zur nächsten Permanentstation, der Messdauer und der benötigten Zeit zum Lösen der Phasenmehrdeutigkeiten gemacht. Während für kurze Abstände die für den SAPOS-Dienst HEPS mit vernetzten Referenzstationen angestrebte Genauigkeit von 1–2 cm eingehalten wird, verschlechtert sich diese für einen Punktabstand von nahezu 30 km auf ca. 5 cm. Mit zunehmendem Abstand zur nächstgelegenen SAPOS-Permanentstation weist die Vernetzungsvariante VRS dem FKP gegenüber einige Vorteile auf. In dieser Untersuchung zeigt sich auch, dass bei einer Punktbestimmung, der eine TTFA von länger als 30 s zu Grunde liegt, eher mit einer schlechten Genauigkeit zu rechnen ist.

Summary

On the basis of an extensive study the availability and accuracy of the SAPOS-real time service HEPS is investigated, using two concepts of networking, namely »area correction parameters« (FKP) and »virtual reference station« (VRS). Parameters for the availability are the time to connect (TTC) with GSM to the SAPOS-centre of Baden-Württemberg in Karlsruhe as well as the required time to solve the ambiguities (TTFA). Conclusions about the accuracy achieved with the Leica SR530 GPS equipment are made with respect to the distance to the nearest reference station, the observation time and the required time for solving the ambiguities. The positioning accuracy of 1–2 cm required for the SAPOS-service HEPS using networking concepts has been fully achieved for shorter distances to the nearest reference station, while the accuracy decreases to about 5 cm for a distance of about 30 km. With increasing distance to the next SAPOS-reference station the VRS concept shows advantages with respect to the FKP concept. Another result of the present study is that a poor accuracy is more likely if the TTFA is longer than 30 s.



1 Einleitung

Der Satelliten Positionierungsdienst der Länder der Bundesrepublik Deutschland (SAPOS) ist inzwischen flächen-deckend eingeführt. Waren die Landesvermessungsämter der einzelnen Bundesländer zunächst damit beschäftigt, das Netz permanent arbeitender Referenzstationen im jeweiligen Bundesland zu installieren, was dem Nutzer eine relative Positionierung zu einer bestimmten Referenzstation ermöglichte, so ist mittlerweile die Vernetzung der Stationen auch über die Bundes- und Landesgrenzen hinaus realisiert oder befindet sich im Probebetrieb. In Abb. 1 ist die Vernetzungssituation für Baden-Württemberg dargestellt. Durch die Vernetzung werden aus den in Echtzeit in der SAPOS-Zentrale zusammengeführten GPS-Beobachtungen Korrekturdaten berechnet und einem Echtzeit-Anwender zur Verfügung gestellt. Die Korrekturdaten modellieren insbesondere die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse der Ionosphäre und Troposphäre sowie in den Broadcast Ephemeriden enthaltene Bahnfehler (Wanninger 1997). Dadurch wird das Lösen der Phasenmehrdeutigkeiten (Ambiguities), was in

Abb. 1: Netz der Referenzstationen mit Testpunkten (SAPOS 2003; modifiziert)

Echtzeit auf dem Rover-Empfänger erfolgen muss, auch für größere Abstände zur nächstgelegenen Referenzstation möglich (Wübbena et al. 1996; Wübbena 2001). Dies wiederum bedeutet für den Betreiber eines Echtzeitdienstes, dass die Abstände zwischen den Referenzstationen bei einer vernetzten Konfiguration größer sein dürfen als bei einer unvernetzten – bei gleich bleibender Genauigkeitsanforderung.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Verfügbarkeit und Genauigkeit des SAPOS-Dienstes HEPS (Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service), der im vernetzten Modus eine Positionsgenauigkeit von 1–2 cm ermöglichen soll. Die erreichbare Genauigkeit im unvernetzten Betrieb wird mit 1–5 cm angegeben.

2 Die Vernetzungsvarianten im SAPOS-HEPS

Der SAPOS stellt unterschiedliche Servicebereiche zur Verfügung. Diese sind mit ihren jeweiligen Übertragungsmedien in Derenbach (1998, 2002) dargestellt. Im hochgenauen Echtzeit-Positionierungs-Service HEPS stehen dem Nutzer grundsätzlich zwei unterschiedliche Vernetzungsvarianten zur Verfügung, um im differentiellen GPS-Modus in Echtzeit zu arbeiten (Wanninger 2000). Sie wird in Baden-Württemberg durch eine einheitliche Telefonnummer bei der Einwahl in die SAPOS-Zentrale selektiert. Von der AdV wurde die Vereinheitlichung der Daten- und Schnittstellenformate im Zusammenhang mit einem deutschlandweiten SAPOS-Dienst beschlossen (AdV 2001). Die SAPOS-Standard-Pflichten und Optionen sind auf dem Link <http://www.sapos.de/index.htm?/einheitlichkeit.htm> zusammengestellt. Unter diesem Link finden sich auch nützliche Angaben, welche Gerätehersteller die SAPOS-Standard-Anforderungen erfüllen, d. h. mit welchen GPS-Empfängern überhaupt im SAPOS-HEPS-Verfahren in Echtzeit gearbeitet werden kann.

2.1 Die Vernetzungsvariante Flächenkorrekturparameter (FKP)

Als SAPOS-Standard-Pflicht müssen die Flächenkorrekturparameter (FKP) über GSM bereitgestellt werden (Derenbach 2002). Seit Mai 2003 ist sie in allen Bundesländern realisiert. Diese aus den vernetzten Referenzstationen für jeden GPS-Satelliten berechneten Koeffizienten werden als RTCM 2.3 Datentyp 59 (Wübbena und Bagge 2002) aufbereitet. Der Datentyp 59 ist kein vom RTCM-Komitee festgelegter Standard zur Übertragung von Vernetzungsinformationen, sondern das Ergebnis einer Absprache der verschiedenen Herstellerfirmen. Durch diese polynomiale, flächenhafte Repräsentation der Fehlerinflüsse auf die Phasenbeobachtungen zu jedem individuellen Satelliten können auch die Einflüsse auf die Rover-Messungen interpoliert und als Korrekturwerte

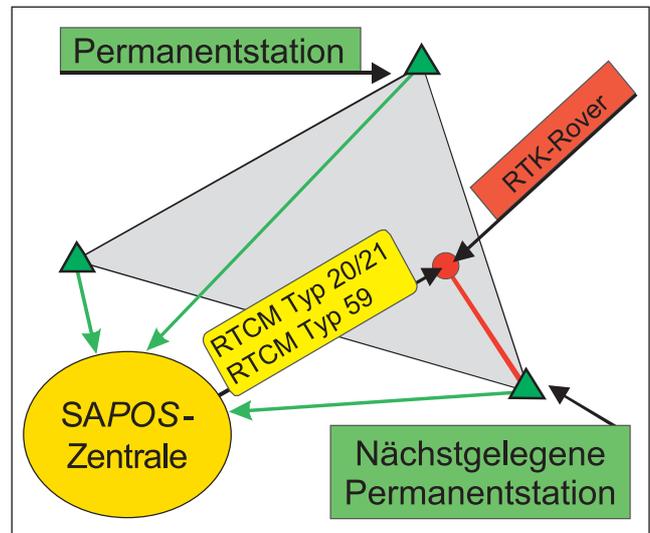


Abb. 2: Prinzipskizze zur FKP-Vernetzungstechnik

angebracht werden. Eine Betrachtung des darin enthaltenen ionosphärischen Anteils wird in Wanninger (1997, 2000) vorgenommen. Das FKP-Vernetzungskonzept ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Die eigentlichen Beobachtungen auf der nächstgelegenen SAPOS-Permanentstation werden in Form von Differenzen der Code- und Phasenbeobachtungen bezüglich der Sollkoordinaten der Referenzstationen im Format RTCM 2.3 Datentyp 20/21 zusammengestellt. Die von der »Radio Technical Commission for Maritime Service« (RTCM) festgelegten Formate für den Datenaustausch im differentiellen GPS sind als »RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Service« veröffentlicht. Sie wurden vom »RTCM Special Committee No. 104« erarbeitet und werden deshalb auch als »RTCM SC-104« bezeichnet.

Durch die Beschränkung auf eine Bezugsstation, von der Phasenbeobachtungen bezogen werden und die gewissermaßen als Masterstation für einen Rover dient, wird die zu übertragende Datenmenge auf ein Minimum reduziert, ferner werden Interpolationsfehler verringert. Vom Rover werden diese Daten über GSM, das sich in der Anwendung des HEPS-Dienstes als Übertragungsmedium durchgesetzt hat, empfangen. Die im Rover-Empfänger registrierten Beobachtungsdaten werden mit den FKP korrigiert. Nun kann auf der Basis der korrigierten Phasenbeobachtungen eine differentielle (PDGPS) Lösung zur nächsten Permanentstation generiert werden. Welche die zum Rover nächstgelegene Referenzstation ist, ergibt die Auswertung der in die SAPOS-Zentrale übermittelten Näherungsposition des Rovers, wenn als Übertragungsmedium das GSM eingesetzt wird, das sich wie bereits erwähnt in der Praxis durchgesetzt hat. In Baden-Württemberg wurde die Übertragung durch 2 m-Funk eingestellt, da die erforderliche quasi Sichtverbindung zwischen Sendestation und Rover auf Grund der topographischen Verhältnisse eine extreme Verdichtung des Sendernetzes erfordert hätte.

2.2 Die Vernetzungsvariante Virtuelle Referenzstation (VRS)

Als SAPOS-Standard-Option wird der Modus Virtuelle Referenzstation (VRS) angeboten (Landau 2002). Wie im Folgenden erläutert, ist eine bidirektionale Kommunikation zwischen Rover und SAPOS-Zentrale erforderlich. Nach Einwahl des Nutzers mit der VRS-Telefonnummer sendet der Rover seine eigenen Koordinaten in einem NMEA-(National Marine Electronics Association)-String zur SAPOS-Zentrale, wie in Abb. 3 angedeutet. Diese stammen aus der aktuellen Navigationslösung, die im Rover-Empfänger generiert wird. Die Genauigkeit dieser Koordinaten, die mit einigen Dezimetern bis Metern angenommen werden kann, ist unerheblich für das VRS-Verfahren. Genau für diese Position werden in der Zentrale aus dem Netz der Referenzstationen Pseudo-beobachtungen (virtuelle Beobachtungen) berechnet und als RTCM 2.3 Datentyp 18/19 dem Rover übermittelt. Dieser kann nun die virtuellen Beobachtungsdaten so verwenden, als wären sie auf einer Referenzstation, die in unmittelbarer Nachbarschaft zur Rover-Antenne steht, beobachtet worden. Dadurch sollen systematische Fehlerinflüsse minimiert werden, die von der Basislinienlänge abhängig sind (Wanninger 1999). Bei diesem Vernetzungskonzept sind kürzere Zeitintervalle zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten (Ambiguities) zu erwarten (Landau 2000).

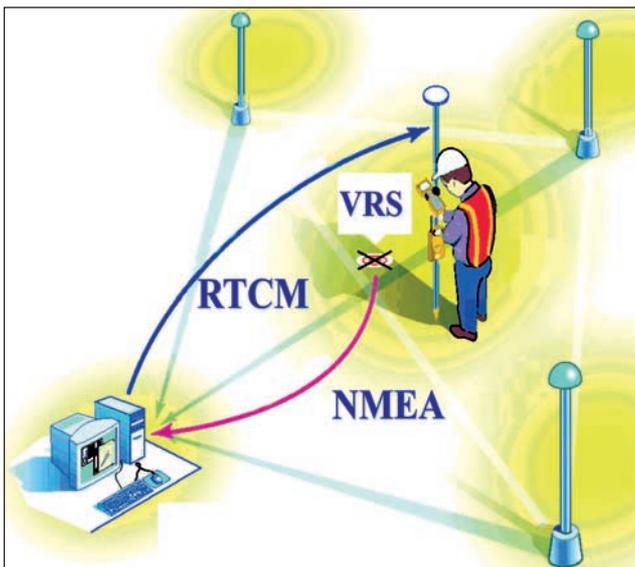


Abb. 3: Prinzipskizze zur VRS-Vernetzungstechnik (Landau 2002)

3 Versuchsaufbau und Methodik der durchgeführten Studie

Im Folgenden soll das bei dieser Studie verwendete Instrumentarium, die Lokalität der Messpunkte sowie der Versuchsablauf und die dabei zu erfassenden Parameter

erläutert werden, die im Hinblick auf die zu treffenden Aussagen über Verfügbarkeit und Genauigkeit des SAPOS-Echtzeitdienstes HEPS als geeignet erscheinen.

3.1 Die verwendete GPS-Ausrüstung

Die Koordinatenmessungen im SAPOS-HEPS wurden mit einem geodätischen Zweifrequenz-Empfänger SR530 der Firma Leica unter Verwendung einer AT502 GPS-Antenne im März 2003 durchgeführt. Bei dieser Echtzeitausrüstung ist das GSM-Modem (Siemens M20), das fest in einer Wetterschutzbox integriert ist, an den GPS-Empfänger seitlich anzuf lanschen. Es können SIM-Karten aus einem gesonderten Handy-Vertrag verwendet werden. Bei allen Messungen wurden die Instrumentenhöhen (Vermarkung - Antennenbezugspunkt ARP) nivellistisch bestimmt.

3.2 Das Testgebiet

Die Testmessungen wurden im Gebiet zwischen den SAPOS-Permanentstationen Heidelberg, Heilbronn, Stuttgart und Karlsruhe durchgeführt (Abb. 1). Um den Einfluss der Basislinienlänge (Abstand zur nächstgelegenen Permanentstation) zu untersuchen, wurden als Beobachtungsorte drei fest vermarkte Punkte ausgewählt. Der erste Punkt »Messdach« ist ein Pfeiler auf dem Messdach des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe (GIK) und ist etwa 28 m von der dortigen Referenzstation KARL entfernt, die vom BKG betrieben und vom GIK betreut wird. Diese Permanentstation ist seit Mai 2002 im SAPOS-Netz eingebunden. Als zweiter Punkt wurde der BWREF-Punkt »Michaelsberg« verwendet, der etwa 14 km von KARL entfernt ist. In der Nähe des Diagonalschnittpunktes der vier genannten Permanentstationen liegt der dritte verwendete Punkt »Kürnbach«. Er ist etwa 29 km von Heilbronn entfernt (vgl. Abb. 1). Für die verwendeten Punkte liegen mittels statischem GPS bestimmte Koordinaten im ETRS89 vor, die bei den nachstehenden Untersuchungen angehalten wurden.

3.3 Methodik

Auf den drei im Abschnitt 3.2 genannten Punkten wurden Messungen unter Zwangszentrierung mit den Vernetzungsvarianten FKP und VRS durchgeführt. Die GPS-Antenne wurde immer nach Norden ausgerichtet. Die Beobachtungsdauer betrug 5 s und 30 s bei einer minimalen Elevation von 13 Grad. Es wurden gleichermaßen Messungen unter »guten Bedingungen« (durchgehend mindestens sieben Satelliten, kein Satellitenwechsel) und »schlechten Bedingungen« (mindestens fünf Satelliten, möglichst Satellitenwechsel im Beobachtungsfenster) durchgeführt. Alle drei Punkte sind frei von Signalabschattungen. Bei allen Varianten wurden jeweils zehn

Echtzeitmessungen durchgeführt, wobei die Einwahl für jede Positionierung neu erfolgte. Im gleichen Sinne wurden jeweils weitere zehn Punktbestimmungen durchgeführt, wobei nur eine Einwahl erfolgte und die fixierten Ambiguities nicht neu gelöst wurden (kontinuierliche Punktmessung). Demzufolge flossen 480 Positionsbestimmungen in die Untersuchung ein.

Der eigentliche Messablauf gestaltete sich auf jedem der drei Testpunkte wie folgt: Nach dem Einschalten des GPS-Empfängers wurde gewartet, bis alle verfügbaren GPS-Satelliten getrackt wurden. Die jeweilige Messung startete mit der Einwahl in die SAPOS-Zentrale. Aus dem Einwahlzeitpunkt und dem Zeitpunkt, zu dem am Display die erfolgreiche Einwahl signalisiert wurde, wurde das für den GSM-Verbindungsaufbau erforderliche Zeitintervall »Time to connect« (TTC) ermittelt. Zwischen dem erfolgten Einwahlzeitpunkt und dem angezeigten erfolgreichen Fixing der Ambiguities wurde das Zeitintervall »Time to fix Ambiguities« (TTFA) ermittelt und dokumentiert. Festgehalten wurden auch die angezeigten inneren Punktgenauigkeiten vor und nach dem Fixing. Nun wurden fünf beziehungsweise 30 Epochen registriert und die Echtzeitlösungen abgespeichert. Je nach Messvariante wurde danach eine neue Punktmessung ausgelöst und mit unveränderten Ambiguities für dieselben Satelliten gearbeitet oder es wurde die GSM-Verbindung getrennt.

4 Ergebnisse

Das umfangreiche Datenmaterial wurde so aufbereitet, dass ein repräsentatives Bild der erzielten Resultate aufgezeigt werden kann. Die vollständigen Ergebnisse sind der Arbeit von Urakawa (Urakawa 2003; unveröffentlicht) zu entnehmen.

4.1 Time to connect (TTC)

Bei jeder Einwahl in die SAPOS-Zentrale in Karlsruhe wurde die Zeit gestoppt, die für den Verbindungsaufbau

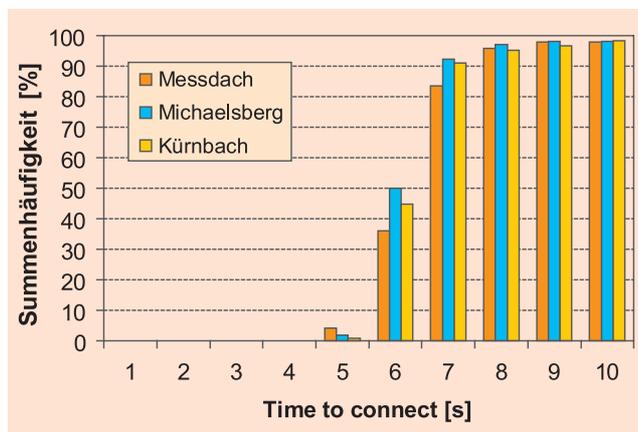


Abb. 4: Time to connect im SAPOS-HEPS via GSM.

zwischen Rover und SAPOS-Zentrale vom Echtzeitsystem benötigt wurde. Die benötigten Einwahlzeiten hängen nicht von der verwendeten Vernetzungsart (FKP oder VRS) ab. In über 95% der getätigten Einwahlen war die Verbindung nach spätestens 8 s aufgebaut. In weniger als 2% der Einwahlversuche konnte keine GSM-Verbindung hergestellt werden. Signifikante Unterschiede zwischen den drei Messpunkten waren nicht festzustellen. In Abb. 4 ist die aufgetretene Häufigkeit der Verbindungszeiten im SAPOS-HEPS für die drei Messpunkte dargestellt.

4.2 Time to fix Ambiguities (TTFA)

Nach erfolgter Einwahl mittels GSM übermittelt der Rover seine Näherungsposition in einem NMEA-String an die SAPOS-Zentrale. Danach werden im FKP-Modus die Phasenkorrekturen und die Koordinaten der nächstgelegenen Referenzstation zusammen mit den Flächenkorrekturparametern, die aus der Vernetzung stammen, an den Rover übermittelt. Im Rover sind nun die Ambiguities zu lösen. Hingegen müssen im VRS-Modus in der SAPOS-Zentrale für die Näherungsposition des Rovers die virtuellen Beobachtungen berechnet und an den Rover übermittelt werden. Erst jetzt kann im Rover die differentielle Phasenauswertung beginnen und es können die Ambiguities gelöst werden. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in den Grafiken 5a–c wider. Dort sind die TTFA's für die drei Messpunkte dargestellt. Während unter Verwendung der FKP nach 5 s mit einem Fixing gerechnet werden kann, ist das bei VRS frühestens nach 10 s der Fall. Von wenigen Ausnahmen abgesehen erfolgt ein Fixieren der Phasenmehrdeutigkeiten frühestens nach 15 s. Generell kann für alle drei Abstandsklassen festgestellt werden: Falls die Ambiguities unter VRS nach ca. 45 s nicht fixiert sind, ist mit einer Lösung auch nicht mehr zu rechnen. Dabei nimmt auch die Wahrscheinlichkeit zu, dass sie falsch oder auch gar nicht gelöst werden. In dieser Situation empfiehlt es sich, die Verbindung zur Zentrale abubrechen und neu einzuwählen oder die Empfangsantenne künstlich abzuschatten, um eine neue Synchronisation mit den aktuellen GPS-Satelliten und der damit verbundenen neuen Mehrdeutigkeitslösung herbeizuführen. Da auch »schlechte« Satellitenkonstellationen in diese Grafiken eingeflossen sind, muss gefolgert werden, dass nicht zu jeder Zeit ein Fixing möglich ist. Die Ursache kann z. B. an der Situation liegen, dass eventuell nur vier gemeinsame Satelliten oder ein häufiger Satellitenwechsel vorliegen.

Beim Vergleich des Fixingverhaltens zwischen FKP und VRS wird aus den Abb. 5a–c eine signifikante Abhängigkeit vom Abstand zur nächsten Permanentstation deutlich. Während auf dem Punkt »Messdach«, dem Pfeilerpunkt auf dem Messdach des GIK, im FKP-Modus alle Ambiguities innerhalb von 40 s richtig gelöst wurden, konnten im VRS-Modus in ca. 8% der Messungen die

Ambiguities nicht innerhalb von 3 min gelöst werden. Nach 3 min wurde jeder Versuch abgebrochen, falls bis dahin die Ambiguities nicht gelöst waren. Falsche Ambiguity-Lösungen gab es auf dem Punkt »Messdach« nicht.

Auf dem BWREF-Punkt »Michaelsberg« kehrt sich das Verhalten deutlich um. Die benötigte Zeit zum Lösen der Phasenmehrdeutigkeiten verhält sich in beiden Echtzeitvarianten in etwa gleich, bis auf die oben bereits festgestellte Tatsache, dass das früheste Fixing unter VRS etwa 5 s später im Vergleich zu FKP erfolgt. Nach 40 s liegen beide Varianten gleich auf, allerdings wird nur für 75% aller Messungen ein korrektes Fixing erreicht. Im FKP-Modus werden in ca. 15% aller Messungen die Ambiguities falsch gelöst. Das entspricht einem Verhältnis von 5:1 zwischen richtig und falsch gelösten Mehrdeutigkeiten. Unter VRS sind es nur halb so viele Punktmessungen mit falsch gelösten Ambiguities. Somit stehen zehn richtige Lösungen einer falschen Lösung der Ambiguities gegenüber – ein Verhältnis von 10:1. Andererseits wird aber mit VRS in ca. 17% der Punktmessungen auch nach 3 min kein Fixing erreicht, mit Flächenkorrekturparametern dagegen in nur ca. 8% der Fälle. Für den Nutzer ist darin ein Vorteil für das VRS-Verfahren zu sehen, ist es doch sinnvoller, keine Lösung zu erhalten als eine falsche.

Wie auf dem Punkt »Michaelsberg« gilt auch für große Entfernungen zur nächsten Permanentstation, wie dies für den Punkt »Kürnbach« mit ca. 29 km der Fall ist, dass in beiden Echtzeitvarianten nach einer Minute nur in ca. 2–3% der Messungen ein Fixing erzielt wird. Schon nach 35 s ist kein nennenswerter Zuwachs an gelösten Ambiguities mehr festzustellen. In beiden Varianten nimmt die Anzahl der Punktmessungen mit falsch gelösten Ambiguities linear zu. Bei FKP kommt auf zwei Punktmessungen mit richtig gelösten Phasenmehrdeutigkeiten eine Messung mit falscher Lösung. Unter Verwendung einer Virtuellen Referenzstation ist dieses Verhältnis mit 3:1 signifikant günstiger für den Anwender.

Zusammenfassend zeigt die Auswertung der benötigten Zeit zum Lösen der Phasenmehrdeutigkeiten (TTFA), dass in beiden Vernetzungsvarianten (FKP und VRS) eine Echtzeitmessung nach 45 s abgebrochen werden sollte (erneut einwählen oder die Ambiguities neu lösen lassen), falls noch kein Fixing der Ambiguities erfolgte. Diese Aussage kann für alle drei betrachteten Abstandsklassen getroffen werden.

4.3 Aussagen zur erzielten Genauigkeit

In allen Testvarianten (FKP, VRS, Neueinwahl für jede Messung oder kontinuierliche Punktmessung nach erfolgtem Fixing, gute und schlechte Konstellation, unterschiedliche Entfernungsklassen zur nächstgelegenen SAPOS-Referenzstation) ist kein Genauigkeitsunterschied zwischen den Punktmessungen mit 5 s oder 30 s Messdauer festzustellen.

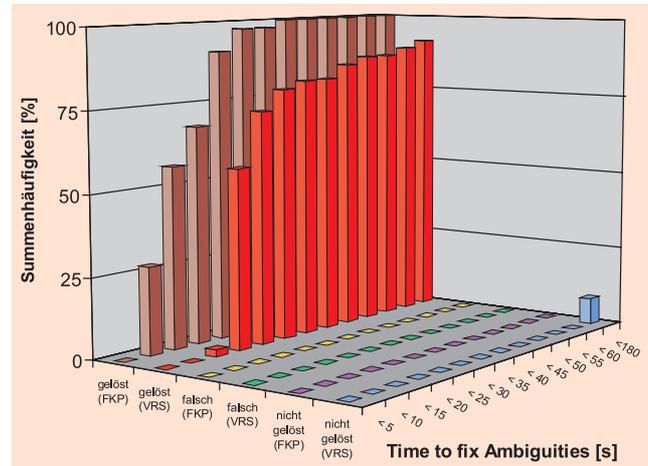


Abb. 5a: Time to fix Ambiguities bei sehr kleinem Abstand (»Messdach«) zur nächsten SAPOS-Referenzstation (28 m)

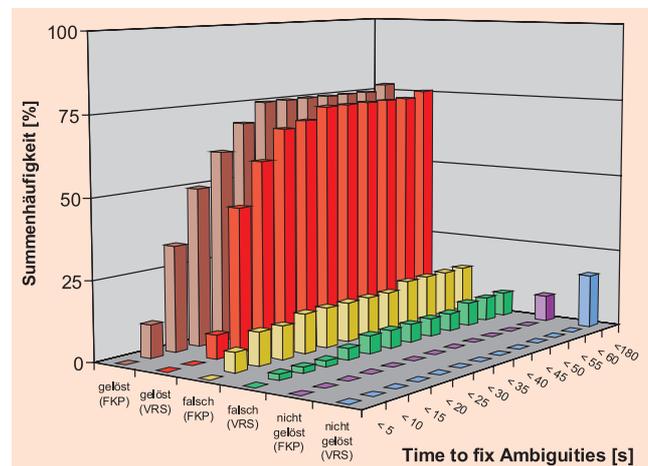


Abb. 5b: Time to fix Ambiguities bei mittlerem Abstand (»Michaelsberg«) zur nächsten SAPOS-Referenzstation (14 km)

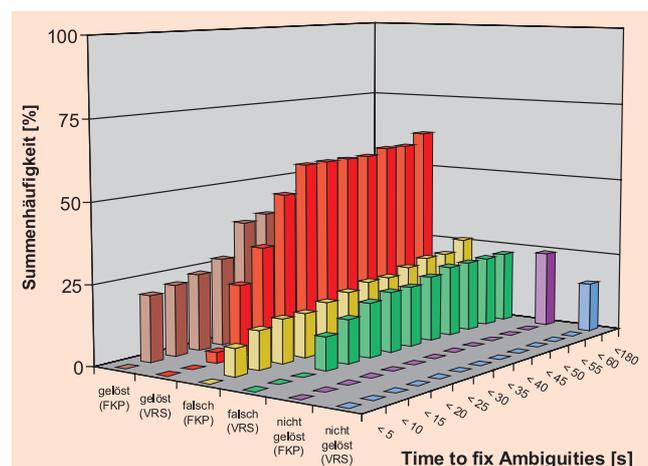


Abb. 5c: Time to fix Ambiguities bei großem Abstand (»Kürnbach«) zur nächsten SAPOS-Referenzstation (29 km)

Im Feld kann die Qualität des Fixings mit der Leica-Ausrüstung anhand der angezeigten 3D-Genauigkeit beurteilt werden. Sie lag bei allen Versuchen in der Regel zwischen 40–80 cm vor dem Lösen der Ambiguities. Nach erfolgreichem Fixieren der Ambiguities sank dieses

3D-Genauigkeitsmaß sprunghaft auf wenige Zentimeter. Die Unterscheidung nach richtig und falsch gelösten Ambiguities erfolgte letztlich auf der Basis des Koordinatenvergleichs mit den vorliegenden Sollkoordinaten, die aus statischen GPS-Messungen bestimmt wurden. Die Koordinatenunterschiede, die sich auf ein geozentrisches kartesisches System (ETRS89) beziehen, wurden der Anschaulichkeit wegen in einem lokalen topozentrischen Horizontsystem dargestellt. Der Ursprung dieses Systems liegt dabei in der jeweiligen Soll-Position des Messpunktes. Die auf die Nord-, Ost- und Zenitrichtung im Messpunkt bezogenen Koordinatenfehler werden im Folgenden mit dn (northing), de (easting) und du (up) bezeichnet. Die du-Koordinate kann hier praktisch mit der Höhenkomponente gleichgesetzt werden.

In den Abb. 6a–c sind jeweils zehn repräsentative, sukzessive Punktmessungen mit ihren Koordinatenabweichungen für die drei Testpunkte dargestellt. Eingetragen sind ferner die Anzahl der GPS-Satelliten (NSV) und der PDOP. Auf dem Punkt »Messdach« in unmittelbarer Nähe zur Referenzstation KARL liegen in beiden Vernetzungsvarianten alle Koordinatendifferenzen unter 2 cm. In den Darstellungen (Abb. 6b, 6c) der Koordinatendifferenzen in den jeweils zehn zeitnahen Positionsbestimmungen (innerhalb 30 min) in den Punkten »Michaelsberg« und »Kürnbach« könnte ein Offset gegenüber der Soll-Position vermutet werden. Tatsächlich weist das Datenmaterial auch Beispiele mit umgekehrtem Vorzeichen auf. Es kann somit lediglich gefolgert werden, dass bei zeitnahen Messungen eine scheinbar hohe innere Genauigkeit erreicht wird, obwohl die absolute Position einige Zentimeter von der Soll-Position entfernt sein kann. Dies legt für den Messablauf nahe, dass bei höheren Genauigkeitsforderungen und großen Abständen zur nächsten SAPOS-Referenzstation Mehrfachmessungen desselben Punktes zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt werden sollten. Hierbei muss vom Echtzeit-Anwender auf dem Hintergrund wirtschaftlicher Aspekte (Zeitaufwand) und Logistik (Messablauf, Punktlokalitäten im Projekt etc.) entschieden und gehandelt werden.

4.3.1 Innere Genauigkeit

Grundlage zur Beurteilung der inneren Genauigkeit ist die Gesamtheit aller Koordinatendifferenzen der Echtzeitlösungen im FKP- und VRS-Modus gegenüber der jeweiligen »Soll-Position«, die aus statischen GPS-Messungen bestimmt wurde. Der in Tab. 1 bezeichnete Mittelwert ist das Mittel der jeweiligen (northing, easting, up) Koordinatenresiduen. Aus den zentrierten Residuen wurden dann die inneren Koordinatengenauigkeiten ermittelt. Wie aus der Tab. 1 hervorgeht, ist eine deutliche Entfernungabhängigkeit beim Verhalten der inneren Genauigkeitsmaße für die Koordinaten und den daraus abgeleiteten mittleren Punktfehler, insbesondere bei FKP und im geringeren Maße bei VRS, erkennbar. Sie liegen für den Punkt »Messdach« bei beiden Vernetzungsvarianten im Subzentimeterbereich. Für mittlere und große Distanzen

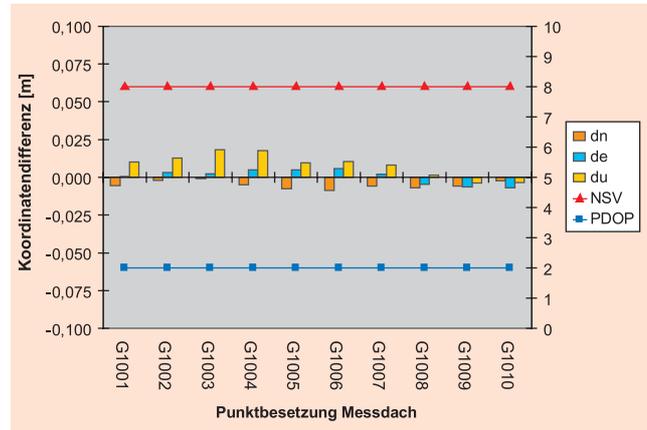


Abb. 6a: Typische Koordinatendifferenzen im Punkt »Messdach«

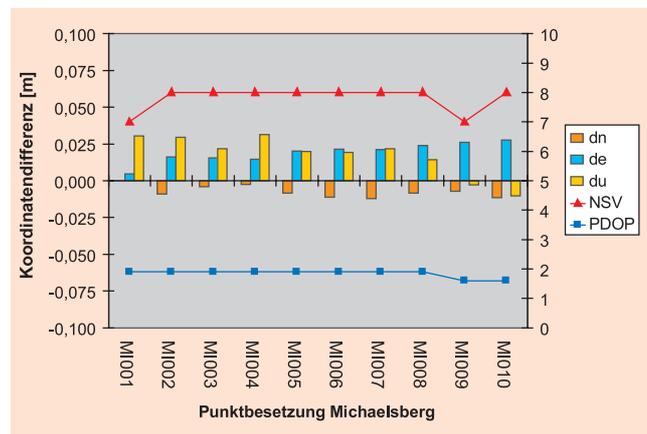


Abb. 6b: Typische Koordinatendifferenzen im Punkt »Michaelsberg«

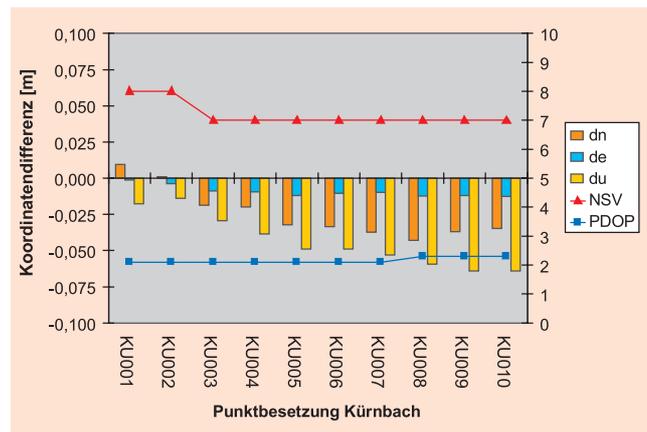


Abb. 6c: Typische Koordinatendifferenzen im Punkt »Kürnbach«

zur nächsten Referenzstation verschlechtert sich die innere Genauigkeit der Echtzeitpositionierung mit FKP auf ca. 2–4 cm in allen Koordinaten. Der mittlere Punktfehler liegt für den Punkt »Michaelsberg« bei 42 mm und für den Punkt »Kürnbach« bei 56 mm. Unter VRS resultieren Punktfehler von 22 mm und 34 mm. Damit ist die Streuung der VRS-Lösungen für mittlere und große Distanzen zur nächsten Referenzstation in etwa nur halb so groß wie unter Verwendung der FKP.

4.3.2 Äußere Genauigkeit

Zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit wurden die Koordinatenabweichungen gegenüber einer statischen Bestimmung der Testpunkte herangezogen. In beiden HEPS-Diensten wird für die sehr kurze Basislinie zum Punkt »Messdach« eine Wiederholgenauigkeit für die Punktpositionen von 12 mm erreicht (Tab. 2). Auf dem Punkt »Michaelsberg« in 14 km Entfernung zur Permanentstation KARL liegen die Punktfehler bei ca. 40 mm. Die Lagekomponenten »northing« und »easting« schneiden mit VRS um den Faktor 2 besser ab als mit FKP. Allerdings wird mit VRS eine schlechtere Höhengengenauigkeit (35 mm) erreicht als dies mit FKP der Fall ist. Im Punkt »Kürnbach« werden die mit 1–2 cm vorgegebenen SAPOS-Genauigkeiten in vernetzten Gebieten (SAPOS 2003) bei einem mittleren Punktfehler einer Einzelmessung von 66 mm nicht erreicht. Das VRS-Verfahren schneidet hier deutlich besser ab und kann das Genauigkeitsniveau des Punktes »Michaelsberg« halten.

Das Mittel aller Punktgenauigkeiten σ_{RTK} , die dem Nutzer im Feld angezeigt werden (Tab. 2), liegt tendenziell in der Größenordnung des berechneten Punktfehlers aller Messungen. In mittleren Entfernungen (»Michaelsberg«) zur nächsten Referenzstation ist er etwas zu optimistisch, doch wird in allen drei Entfernungsklassen das relative Genauigkeitsverhalten zwischen FKP und VRS gut erfasst. Die am Controller angezeigte Punktgenauigkeit

nach dem Fixieren der Phasenmehrdeutigkeiten kann somit im Feld als ein Kriterium zur Beurteilung der zu erwartenden äußeren Punktgenauigkeit herangezogen werden. Er weist eine tendenziell lineare Abhängigkeit vom Abstand zur nächsten SAPOS-Referenzstation auf und kann bei FKP mit 13 mm + 1.1 ppm und bei VRS mit 15 mm + 0.4 ppm abgeschätzt werden.

4.3.3 Äußere Genauigkeit und »Time to fix Ambiguities«

In Tab. 3 ist der aus Abweichungen von den Soll-Koordinaten berechnete mittlere Punktfehler für eine Einzelmessung auf den drei Testpunkten unter Verwendung der Echtzeitverfahren FKP und VRS in drei Klassen aufgeteilt. Die erste Klasse gibt den mittleren Punktfehler für die entsprechenden Punktlösungen mit einem TTFA bis 20 s wieder. In die zweite Klasse sind die Punktfehler für die Fixings, die zwischen 21 s und 30 s dauerten, eingegangen. Die dritte Klasse zeigt den mittleren Punktfehler für die Lösungen mit einer Fixingzeit größer als 30 s. Für kurze Entfernungen zur nächsten Referenzstation werden für die Echtzeit-Korrekturverfahren FKP und VRS gleichgenaue Ergebnisse erzielt. Tendenziell kann Tab. 3 so interpretiert werden, dass der mittlere Punktfehler mit zunehmender Dauer für das Fixing ansteigt. Für mittlere und große Entfernungen ist dieses Verhalten für FKP ausgeprägter als unter VRS. Zusammen mit den Aussagen zum TTFA im Abschnitt 4.2 kann generell festgehalten

Tab. 1: Innere Genauigkeit [mm] der FKP- und VRS-Echtzeitmessungen

Messpunkt	Messdach		Michaelsberg		Kürnbach	
	FKP	VRS	FKP	VRS	FKP	VRS
Vernetzung						
Mittelwert / σ_{dn}	-3 / 4	-4 / 6	-3 / 21	-9 / 9	-10 / 42	3 / 21
Mittelwert / σ_{de}	0 / 3	1 / 5	-9 / 23	8 / 7	4 / 27	-4 / 11
Mittelwert / σ_{du}	9 / 5	6 / 5	4 / 28	29 / 19	-33 / 26	-17 / 25
Punktfehler	7	9	42	22	56	34

Tab. 2: Äußere Genauigkeit [mm] der FKP- und VRS-Echtzeitmessungen

Messpunkt	Messdach		Michaelsberg		Kürnbach	
	FKP	VRS	FKP	VRS	FKP	VRS
Vernetzung						
σ_{RTK}	13	15	27	19	51	25
σ_{northing}	5	7	21	13	43	21
σ_{easting}	3	5	24	11	28	11
σ_{up}	10	8	28	35	42	30
Punktfehler	12	12	43	38	66	38

Tab. 3: Mittlerer Punktfehler [mm] und TTFA

Messpunkt	Messdach		Michaelsberg		Kürnbach	
	FKP	VRS	FKP	VRS	FKP	VRS
Vernetzung						
TTFA \leq 20 s	13	11	38	32	31	29
20 s < TTFA \leq 30 s	12	12	35	37	69	37
30 s < TTFA \leq 180 s	17	15	58	40	89	44

werden, dass eine Messung abgebrochen werden sollte, falls nach 30 s die Phasenmehrdeutigkeiten nicht gelöst sind.

5 Schlussbemerkungen

Ziel dieser Studie war es, die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des SAPOS-Echtzeitdienstes HEPS mit den Vernetzungsvarianten FKP und VRS zu untersuchen. Als Datengrundlage dienten die im Rahmen des Projeto Final von Austauschstudent Marcio José Urakawa (Urakawa 2003; unveröffentlicht) am GIK durchgeführten Messungen.

Die Messpunkte lagen in drei Abstandsklassen von der nächsten SAPOS-Referenzstation entfernt. In nur 28 m Entfernung zur Permanentstation KARL auf dem Messdach des GIK wurden Echtzeitmessungen auf einem Pfeiler durchgeführt. Die mittlere Entfernungsklasse wurde durch den 14 km von KARL entfernten BWREF-Punkt »Michaelsberg« repräsentiert. Mit 29 km liegt der BWREF-Punkt »Kürnbach« am weitesten von einer Referenzstation innerhalb der Masche Karlsruhe – Heidelberg – Heilbronn – Stuttgart entfernt und steht für die dritte Entfernungsklasse.

Im Testgebiet zwischen Karlsruhe und Stuttgart konnte mit GSM in nahezu 100 % aller Einwahlversuche eine Verbindung zur SAPOS-Zentrale aufgebaut werden. Mit der verwendeten GPS-Ausrüstung der Firma Leica (SR530, AT502) dauerte dies zwischen 6 s und 10 s. Nach ca. 7 s lag in 90 % aller Versuche eine erfolgreiche Einwahl vor. Das Lösen der Ambiguitäten dauerte beim VRS-Konzept etwa 5–10 s länger als mit FKP, was durch die konzeptionellen Unterschiede der beiden Vernetzungsvarianten zu erklären ist, aber auch durch die technischen Realisierungen in der verwendeten Ausrüstung und der SAPOS-Zentrale bedingt sein kann. Wurden auf dem Punkt »Messdach« nahezu alle Ambiguitäten gelöst, so sank die Erfolgsquote am Punkt »Michaelsberg« auf 75 % für beide Vernetzungsvarianten. Auf dem Punkt »Kürnbach« setzte sich dieses abstandsabhängige Verhalten fort. Es wurde auch eine signifikante Abhängigkeit der erzielten Genauigkeit von der Basislinienlänge zur nächsten Permanentstation deutlich, die im Vergleich mit Sollkoordinaten verifiziert wurde. In dieser Studie erwies sich die Vernetzungsart »Virtuelle Referenzstation« in Verbindung mit der eingesetzten GPS-Echtzeitausrüstung von Leica als die bessere Variante, was die erzielte Genauigkeit und Zuverlässigkeit anbelangt. Dies wurde besonders mit wachsendem Abstand zur nächsten Permanentstation deutlich. Die vom SAPOS-Systembetreiber (<http://www.sapos.de/>) angegebene, zu erwartende Positionsgenauigkeit von 1–2 cm in vernetzten Gebieten konnte für größere Abstände zur nächsten SAPOS-Station nicht bestätigt werden. Hingegen wurde im Allgemeinen die Fehlerschranke von 5 cm nicht überschritten. Für kürzere Abstände kann von 1–2 cm

Genauigkeit gesprochen werden. Mehrfachmessungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Konstellationswechsel) und anschließende Mittelbildung ist zu empfehlen, sofern es die Wirtschaftlichkeit und Projektlogistik zulassen.

Die vorliegende Studie kann als Status einer Momentaufnahme gewertet werden. Schon drei Monate nach Durchführung der Messungen wurde ein Update der zentralen Vernetzungssoftware in der SAPOS-Zentrale in Karlsruhe durchgeführt, womit eine weitere Genauigkeitssteigerung zu erwarten ist. Sicher sind auch die vorgelegten Ergebnisse nicht unbedingt auf andere GPS-Messausrüstungen direkt zu übertragen. Jüngste Vergleichsmessungen, die im Rahmen einer Studienarbeit am GIK (Knöpfler 2003; unveröffentlicht) mit den geodätischen Echtzeitausrüstungen der Firmen Leica (SR530, AT502) und Trimble (5800) durchgeführt wurden, zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede in der erzielten Genauigkeit und zwischen den verwendeten GPS-Empfängern.

Dank

Die Durchführung und Untersuchungen der RTK-Messungen im FKP- und VRS-Echtzeitmodus des SAPOS-HEPS-Dienstes waren Inhalt des Projeto Final des Austauschstudenten Marcio José Urakawa (Urakawa 2003; unveröffentlicht) aus Curitiba/Brasilien am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe. Dem Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior (CAPES) und dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) wird für die im Rahmen des studentischen Austauschprojektes UNIBRAL zwischen Brasilien und Deutschland gewährte finanzielle Unterstützung gedankt. Unser Dank gilt ferner Herrn Heinrich Derenbach vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Abteilung Geodäsie in Karlsruhe, für die Unterstützung.

Literatur

- AdV: <http://www.geopp.com/aktuelles/Beschluss-SAP0S-28.11.2001.pdf>, 2001.
- Derenbach, H.: SAPOS – Stand und Entwicklung in Baden-Württemberg. In: GPS für Anwender. Beiträge zum DVW-Seminar vom 05.–07. Oktober 1998 in Karlsruhe. DVW Mitteilungen Baden-Württemberg, Heft 2, Oktober 1998, 45. Jahrgang, 125–137, 1998.
- Derenbach, H.: SAPOS aktuell. In: GPS2002: Antennen, Höhenbestimmung und RTK-Anwendungen. Beiträge zum 57. DVW-Seminar am 16. und 17. September 2002 in Karlsruhe. Verlag Konrad Wittwer, 19–27, 2002.
- Knöpfler, A.: Vergleich der SAPOS®-Echtzeit-Ausrüstungen Leica SR530 und Trimble 5800. Studienarbeit am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe, 43 Seiten, unveröffentlicht, 2003.
- Landau, H.: GPS-Vermessung mit Hilfe von Virtuellen Referenzstationen – Theorie, Analyse und Applikationen. DVW-Bayern, Mitteilungsblatt 2/2000, 137 ff., 2000.
- Landau, H.: Virtual Reference Station Systems. Journal of Global Positioning Systems. Vol. 1, No. 2: 137–143. (<http://surveypartners.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-93155/Virtual%20Reference%20Station%20Systems.doc>), 2002.

- SAPOS: SAPOS® Baden-Württemberg: http://www.lv-bw.de/lvshop2/ProduktInfo/sapos/sapos_in_bw.htm, 2003.
- Urakawa, M.J.: Determination and Comparison of Precise Geodetic Coordinates Using FKP and VRS Techniques. Diplomarbeit (Projeto Final) am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe, 34 Seiten, unveröffentlicht, 2003.
- Wanninger, L.: Real-Time Differential GPS Error Modelling in Regional Reference Station Networks. Proceedings of the IAG Scientific Assembly, Rio de Janeiro, Sep. 1997, IAG Symposia 118, Springer Verlag, 86–92, 1997.
- Wanninger, L.: Der Einfluss ionosphärischer Störungen auf die präzise GPS-Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen. ZfV 124, 322–330. [<http://www.gi.geo.tu-dresden.de/gg/publikat/zfvokt99.pdf>], 1999.
- Wanninger, L.: Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenznetzen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 508, 2000.
- Wübbena, G.: Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover. [<http://www.ife.uni-hannover.de/mitarbeiter/seeber/seeber60/wuebbena.pdf>], 2001.
- Wübbena, G., Bagge, A.: RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP. Geo++® White Paper Nr. 2002.01 [<http://www.geopp.de/download/geopp-rtcm-fkp59.pdf>], 2002.
- Wübbena, G., Bagge, A., Seeber, G., Böder, V., Hankemeier, P.: Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1845–1852, 1996.

Internetseiten

SAPOS®: <http://www.sapos.de>

RTCM: <http://www.rtcn.org/contact.php>

NMEA: <http://www.nmea.org>

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Kurt Seitz / Prof. Dr.-Ing. Bernhard Heck

Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe

Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe

seitz@gik.uka.de / heck@gik.uka.de

Eng. Cartógrafo Marcio José Urakawa / Prof. Dr. Claudia Krueger

Departamento de Geomatica, Universidade Federal do Parana (UFPR),

Centro Politecnico, Jardim das Americas, Curitiba, CEP 81531-990,

Parana (Brasilien)

ckrueger@ufpr.br