

**Martin Giese,
Julianna Kaczkowski,
Armin Lange,
Christiane Stiegert,
Juliane Wiegratz,
Pawel Zakrzewski,
Lambert Wanninger**

Berechnungsdienste für *Precise Point Positioning* (PPP)¹

Post-processing Services for Precise Point Positioning (PPP)

Für die Auswertung von GPS-Zweifrequenz-Beobachtungen mit der als *Precise Point Positioning* bezeichneten Technik stehen kostenlose Berechnungsdienste zur Verfügung. Vier solche Dienste wurden einem Vergleichstest unterzogen. In Abhängigkeit von Beobachtungsdauer und -qualität sind solche Dienste fähig, Zentimeter- bis Dezimeter-genaue dreidimensionale Koordinaten zu liefern.

Schlüsselbegriffe: GNSS, Precise Point Positioning, Berechnungsdienste

Several free post-processing services exist for the evaluation of dual-frequency GPS-observations using the Precise Point Positioning technique. We tested and compared four such services and obtained three dimensional coordinates on the centimetre to decimetre level depending on observation time span and observation quality.

Keywords: GNSS, Precise Point Positioning, Post-processing Services



1 Einleitung

Precise Point Positioning (PPP) ist eines der GNSS-Mess- und Auswerteverfahren, die primär die hochpräzisen GNSS-Phasenmessungen verwenden und somit Positionsgenauigkeiten im sub-Meter bis cm-Bereich erreichbar machen. PPP kommt dabei ohne lokale oder regionale Referenzstationen aus und unterscheidet sich damit deutlich von den differentiellen Verfahren (Zumberge u. a. 1997, Kouba und Héroux 2000, Heßelbarth 2009). PPP ist global einsetzbar und liefert für Beobachtungsdaten aus allen Erdregionen ähnliche Positionsgenauigkeiten. Es kann sowohl für statische als auch für kinematisch gemessene Daten eingesetzt werden.

Um tatsächlich Dezimeter- oder Zentimetergenauigkeiten bei einer PPP-Auswertung zu erreichen, müssen Zweifrequenz-Beobachtungen vorliegen. Weiterhin hängen die erzielbaren Genauigkeiten stark von der Dauer kontinuierlicher Phasenmessungen ab. Zudem ist PPP auf präzise GNSS-Orbitdaten und zeitlich hochaufgelöste Satellitenuhrkorrekturen angewiesen (Heßelbarth 2009). Eine häufig verwendete Quelle für diese Daten ist der *International GNSS Service* (IGS), der diese mit zeitlicher Verzögerung veröffentlicht (Kouba 2009, siehe auch unter igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html).

Eine Besonderheit von PPP ist, dass es kostenfreie Berechnungsdienste gibt, die die Auswertung der Beobachtungsdaten vornehmen und die Ergebnisse zur Verfügung stellen. Inzwischen existieren vier derartige Berechnungsdienste, die wir einem Vergleichstest unterzogen haben. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines Projektes des Vertiefungsstudiums „Landes- und Ingenieurvermessung“ des Diplomstudienganges Geodäsie an der TU Dresden im Studienjahr 2009/10 erzeugt. Für einen ähnlichen Vergleichstest von GPS-Berechnungsdiensten im Studienjahr 2005/06 waren erst zwei PPP-Dienste verfügbar gewesen. Zusätzlich wurden aber zwei Dienste, die relative Positionsbestimmung in Netzen von Referenzstationen durchführen, in den Vergleich einbezogen. Nur zwei der vier damals getesteten Dienste konnten akzeptable Ergebnisse liefern, die von Stadler u. a. (2007) veröffentlicht wurden.

Andere Veröffentlichungen bezüglich PPP-Berechnungsdiensten beziehen sich meist auf den sinnvollen Einsatz von PPP im Allgemeinen, dargestellt am Beispiel eines einzelnen Dienstes, z. B. Ebner und Featherstone (2008). Weitere Vergleiche aller vier hier getesteten PPP-Dienste sind uns nicht bekannt.

¹ Überarbeitete Fassung eines Vortrags beim 100. DVW-Seminar „GNSS 2010: Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert“ am 04./05. Oktober 2010 in Köln. Der Originalseminarbeitrag ist im Band 63 der DVW-Schriftenreihe beim Wißner-Verlag, Augsburg, erschienen.

2 PPP-Berechnungsdienste

Die vier getesteten PPP-Dienste stehen allen Nutzern kostenfrei zur Verfügung. Eventuelle kostenpflichtige Ergänzungen zu den kostenfreien Angeboten wurden von uns nicht betrachtet. Alle Dienste wurden mit ihren Standardeinstellungen genutzt.

Ein Teil der Dienste verwendet die präzisen Orbit- und Satellitenuhrprodukte des IGS. Dazu gehören der Dienst *Canadian Spatial Reference System (CSRS) Precise Point Positioning* (www.geod.nrcan.gc.ca, Mireault u. a. 2008), der von *Natural Resources Canada (NRCan)* betrieben wird, und der Dienst *GPS Analysis and Positioning Software (GAPS, gaps.gge.unb.ca, Leandro 2007)*, der an der *University of New Brunswick* entwickelt wurde.

Der Dienst *magicGNSS* (magicgnss.gmv.com, Piriz u. a. 2008), welcher von der spanischen Firma GMV angeboten wird, verwendet eigene Orbit- und Satellitenuhrprodukte bis die entsprechenden IGS-Produkte zur Verfügung stehen. Nur das *Automatic Precise Point Positioning (APPS)* vom *Jet Propulsion Laboratory* (apps.gdgps.net) ist ganz unabhängig von IGS-Produkten. Es nutzt eigene präzise Orbits und Satellitenuhrkorrekturen, welche auf den Beobachtungsdaten eines globalen Referenzstationsnetzes beruhen.

Weitere Informationen zu den Eigenschaften aller Dienste können der Tabelle 1 entnommen werden. Große Ähnlichkeiten der Dienste bestehen im *Web-Interface*, im erwarteten Format der Beobachtungsdaten, in der Ergebnisübermittlung und im Referenzsystem der Koordinaten. Das System bezieht sich meist auf ITRF05, aber auch lokale Referenzsysteme werden wiedergegeben, darunter aber nicht ETRS89 für Beobachtungsstationen aus Deutschland.

Des Weiteren fällt auf, dass *magicGNSS* augenblicklich als einziger Dienst in der Lage ist, auch GLONASS-Daten zu verarbeiten. Auch dies wurde getestet und es zeigte sich, dass die zusätzlichen Satellitensignale eine Genauigkeitssteigerung bewirken. Diese Ergebnisse sind aber nicht in die Betrachtungen in Abschnitt 3.3 eingeflossen, weil kein Vergleich unterschiedlicher Dienste möglich war.

3 Vergleich der PPP-Berechnungsdienste

Um die vier Dienste zu testen und deren Resultate vergleichen zu können, wurden an alle die gleichen Testdatensätze zur Auswertung geschickt. Sämtliche Berechnungsergebnisse wurden im Februar/März 2010 erzeugt.

3.1 Testdatensätze

Es wurden sowohl statistische als auch kinematische Testdatensätze mit unterschiedlicher Beobachtungsqualität verwendet. Statische Daten mit „guter Datenqualität“ stammen von ausgewählten Referenzstationen des *EUREF Permanent Network (EPN)*: DRES, HOBUS, KLOP, POUS (Abb. 1). Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass Daten von unterschiedlichen Empfängertypen in den Vergleich einbezogen wurden. Aus den 24 h-Datensätzen der Tage 15./16.05., 14./15.08. und 15./16.11.2009 wurden einzelne 1 h-Datensätze herausgeschnitten. Weitere statische Beobachtungsdaten wurden im Zeitraum 13.-17.02.2010 in Dresden selbst erzeugt. Diese „mittelguten Datensätze“ weisen leichte Abschattungen und vermehrte Mehrwege- und Signalbeugungseinflüsse auf.

Tab. 1: Eigenschaften der vier untersuchten PPP-Dienste

PPP-Dienste	APPS	CSRS	GAPS	magicGNSS
Getestete Version	–	v1.04-1087	v4.1-R20100505	v2.3
Beobachtungsdaten				
Datenübermittlung zum Server	<i>Web-Interface, E-Mail</i>	<i>Web-Interface</i>	<i>Web-Interface</i>	<i>Web-Interface, E-Mail</i>
Beobachtungsdaten	GPS, Ein-/Zwei-frequenz, Statik/ Kinematik	GPS, Ein-/Zwei-frequenz, Statik/ Kinematik	GPS, Zweifrequenz, Statik/Kinematik	GPS/GLONASS, Zweifrequenz, Statik
Datenformat	RINEX 2, Hatanaka	RINEX 2, Hatanaka	RINEX 2, Hatanaka	RINEX 2, Hatanaka
Datenprozessierung				
Satellitenorbits/-uhren	eigene	IGS	IGS	eigene/IGS
Stützpunktstand der Satellitenuhrkorrekturen	5 min (?)	30 s, 5 min	5 min	30 s, 5 min
Antennenkorrekturen	eigene Datei	IGS	IGS	IGS
Berechnungsergebnisse				
Ergebnisübermittlung	Link per <i>E-Mail</i>	Link per <i>E-Mail</i>	Link per <i>E-Mail</i>	Link per <i>E-Mail</i>
Referenzsystem	ITRF05	ITRF05/NAD83	ITRF05/NAD83	ITRF05
Koordinatendarstellung	L,B,H / X,Y,Z	L,B,H / X,Y,Z / UTM	L,B,H / X,Y,Z	L,B,H / X,Y,Z
Qualitätsinformationen	Kovarianzmatrix	Standardabweichungen	Standardabweichungen	–



Abb. 1: Ausgewählte EUREF-Permanentstationen für statische PPP-Datenauswertung

Der erste kinematische Datensatz wurde vom Bundesamt für Seeschifffahrt (BSH) zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um einen 3 h-Ausschnitt einer Fahrt des Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiffes Deneb auf der Ostsee vom 10.03.2009 (Abb. 2). Um einen zweiten Datensatz verwenden zu können, wurde ein Teil der selbst beobachteten statischen Messungen kinematisch ausgewertet.

Als Vergleichswerte wurden für die Referenzstationen ITRF05/IGS05-Koordinaten der EUREF-Auswertung gewählt. Bei den Testdatensätzen, für die keine entsprechenden Werte vorlagen, wurden Sollkoordinaten aus Basislinienberechnungen zu nahe gelegenen Referenzstationen, für die ITRF05-Koordinaten vorlagen, ermittelt.

3.2 Erfahrungen mit den Diensten

Alle Dienste erwiesen sich in ihrer Bedienung als benutzerfreundlich und erforderten lediglich eine kurze Einarbeitungszeit. Das Hochladen einzelner Beobachtungsdateien war einfach und problemlos möglich. Im Allgemeinen wiesen die PPP-Dienste kurze Antwortzeiten von weniger als 5 Minuten auf. Sie lieferten dabei eine übersichtliche Zusammenfassung der Ergebnisse sowie detaillierte Informationen zur Berechnung.

Allerdings traten auch Probleme auf. Ein kompaktes Hochladen großer Mengen an Beobachtungsdateien war nicht möglich. Eine Nutzung der Dienste für große Datenmengen ist daher sehr aufwendig.

Bei GAPS konnten nicht immer alle Datensätze ausgewertet werden. Teilweise dauerte die Berechnung sehr



Abb. 2: Fahrtabschnitt des Vermessungsschiffes Deneb ausgewählt für kinematische PPP-Datenauswertung und Referenzstation Warnemünde (WARN), die für die Basislinienberechnung verwendet wurde

lang oder musste mehrmals wiederholt werden, bevor GAPS ein Ergebnis lieferte. Weiterhin waren bei GAPS einige berechnete Koordinaten als Ausreißer einzustufen, welche sich nur durch entsprechende Tests des Datenmaterials lokalisieren ließen. Des Weiteren stand während der praktischen Testphase der Dienste die kinematische Auswertung bei GAPS nicht zur Verfügung.

Ein Antennentyp war APPS unbekannt und musste in den RINEX-Beobachtungsdateien auf einen ähnlichen Typ geändert werden. Weiterhin gab es bei APPS Probleme mit dem zweiten kinematischen Datensatz, der nicht fehlerfrei berechnet werden konnte.

3.3 Testergebnisse

Bei statischen Messungen wurde zwischen einer Stunde und 24 Stunden Beobachtungsdauer unterschieden. Die Ergebnisse für eine Stunde Beobachtungsdauer wurden zusätzlich unterteilt in „gute“ und „mittelgute“ Datenqualität. Des Weiteren wurden kinematische Datensätze von 3 Stunden Dauer genutzt. Alle Koordinatenergebnisse der Dienste wurden mit den jeweiligen Sollkoordinaten verglichen.

Statische Auswertung, 1 h-Beobachtungsdauer

Bei einer Stunde Beobachtungsdauer und „guter“ Datenqualität gelang es allen vier Diensten, hochwertige Ergebnisse zu erzeugen (Tab. 2). Die Genauigkeiten liegen im Wesentlichen auf einem ähnlichen Niveau von jeweils wenigen Zentimetern Standardabweichung in allen drei Koordinatenkomponenten, wobei die Nordkomponente am besten, die Höhenkomponente am zweitbesten und die Ostkomponente am schlechtesten bestimmt werden konnte. Diese Rangfolge der Koordinatengenauigkeiten ist typisch für diese Art von PPP-Berechnungen, bei denen

Tab. 2: Ergebnisse statischer Auswertung (1 h-Dauer, gute Datenqualität, GPS)

PPP-Dienst	Anzahl	fehlende Ergebnisse/ Ausreißer	Standardabweichungen [cm]		
			Nord	Ost	Höhe
APPS	48	0	2,5	5,4	3,5
CSRS	48	0	2,6	5,6	3,9
GAPS	48	0	1,8	4,6	2,9
magicGNSS	48	0	2,5	7,7	5,9

Tab. 3: Ergebnisse statischer Auswertung (1 h-Dauer, mittelgute Datenqualität, GPS)

PPP-Dienst	Anzahl	fehlende Ergebnisse/ Ausreißer	Standardabweichungen [cm]		
			Nord	Ost	Höhe
APPS	35	0	3,3	3,7	11,0
CSRS	35	0	2,9	6,7	9,6
GAPS	35	6	2,7	4,1	6,2
magicGNSS	35	0	6,0	15,7	20,3

Tab. 4: Ergebnisse statischer Auswertung (24 h-Dauer, GPS)

PPP-Dienst	Anzahl	fehlende Ergebnisse/ Ausreißer	Standardabweichungen [cm]		
			Nord	Ost	Höhe
APPS	28	0	0,4	0,7	1,0
CSRS	28	0	0,4	0,4	0,8
GAPS	28	8	0,5	0,6	1,3
magicGNSS	28	0	0,5	0,5	1,1

die Phasenmehrdeutigkeiten nicht auf ganzzahlige Werte festgesetzt werden (Stadler u. a. 2007).

Etwas bessere bzw. schlechtere Ergebnisse produzierten GAPS bzw. magicGNSS. Bei GAPS fallen alle Koordinaten-Standardabweichungen geringer aus als bei den anderen Diensten. Die nähere Untersuchung ergab, dass GAPS nur Beobachtungen zu den 5-Minuten-Epochen der Satellitenuhrkorrekturen verwendet hat. Die Beschränkung auf die besten Messepochen erzeugte anscheinend diesen Genauigkeitsvorteil. Die Ergebnisse von magicGNSS sind in der Ost- und Höhenkomponente ungenauer als die der anderen Dienste.

Auch zu den 1 h-Daten „mittelguter“ Qualität lieferten die vier Dienste allesamt Ergebnisse zurück (Tab. 3). Ein Problem ergab sich bei GAPS. Dort zeigten sich teilweise größere Differenzen zu den Sollkoordinaten, so dass die betroffenen Ergebnisse als Ausreißer identifiziert wurden und aus den weiteren statistischen Berechnungen ausgeschlossen werden mussten.

Es ist zu erkennen, dass bei den „mittelguten“ Daten insbesondere die Genauigkeiten der Höhenkomponente deutlich schlechter ausfallen als bei den „guten“ Daten. Die Standardabweichungen in der Höhe liegen jetzt auf dem Ein-Dezimeter-Niveau und fallen immer schlechter aus als die der Ostkomponente. Besonders große Genauigkeitsverluste in allen Koordinatenkomponenten treten bei den magicGNSS-Ergebnissen auf.

Statische Auswertung, 24 h-Beobachtungsdauer

Bei der Bearbeitung der vollständigen Tagesdatensätze traten Probleme bei GAPS auf (Tab. 4). Keine Ergebnisse konnten für die acht Datensätze des Mai 2009 erzielt werden.

Im Vergleich zu den 1 h-Datensätzen sind mit 24 h-Datensätzen deutlich höhere Koordinatengenauigkeiten erzeugbar. Hier lieferten alle vier Dienste fast identische Genauigkeiten (Tab. 4). Die Standardabweichungen der Nord- und Ostkomponente liegen deutlich unter einem Zentimeter und die der Höhe um einen Zentimeter. Systematische Koordinatenabweichungen waren nicht zu erkennen.

Kinematische Auswertung

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen war es nur bei zwei Diensten (APPS und CSRS) möglich, kinematische Datensätze auswerten zu lassen. Bei GAPS befand sich diese Funktion in Überarbeitung und war abgestellt. magicGNSS bietet bisher keine kinematische Auswertung an.

In Abbildung 3 sind die jeweiligen Differenzen zur Sollposition einzeln in den Koordinatenkomponenten Nord, Ost und Höhe jeweils mit ermittelter quadratischer Abweichung (RMS – *Root Mean Square*) dargestellt. Obwohl APPS angibt, Satellitenuhrkorrekturen im 5-Minuten-Abstand für die Prozessierung zu nutzen, weist der glatte Verlauf der Koordinatenabweichungen darauf hin, dass APPS wesentlich dichtere Uhrenstützpunkte (1 ... 30 Sekunden) nutzt. Die Ergebnisse von CSRS

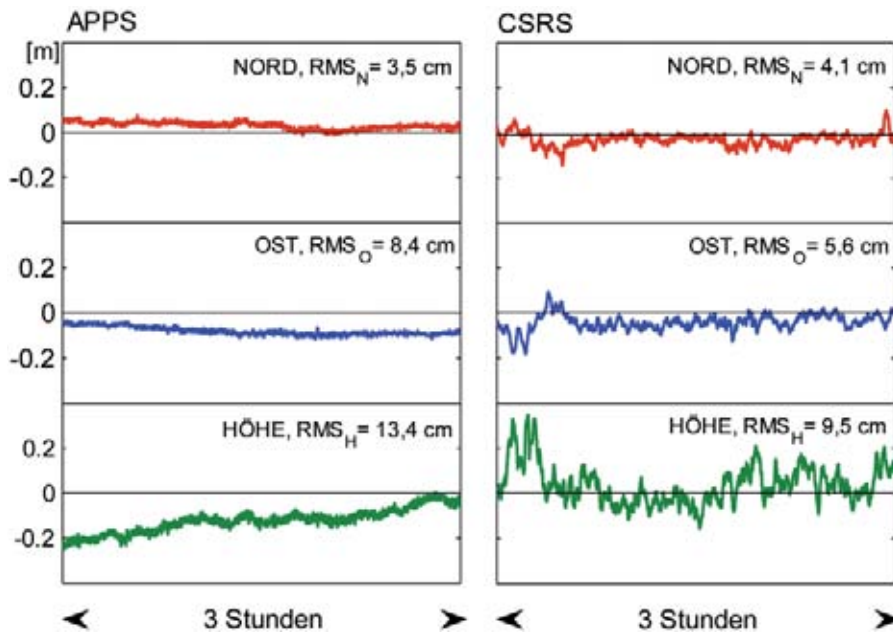


Abb. 3: Kinematische Testergebnisse

sind deutlich verrauschter, was auf die Verwendung von Uhrkorrekturen im 5-Minuten-Abstand hinweist. Langperiodische Abweichungen der Koordinaten von den Sollwerten sind insbesondere in der Höhenkomponente der APPS-Lösung deutlich zu erkennen. Entsprechende systematische Abweichungen treten in der CSRS-Lösung nicht auf.

Vergleichend kann gesagt werden, dass beide Dienste ähnlich genaue kinematische Ergebnisse lieferten: in den horizontalen Komponenten wesentlich besser als einen Dezimeter, in der Höhe um einen Dezimeter.

Zur Untersuchung wurde auch ein zweiter kinematischer Datensatz zur Auswertung an die Dienste übermittelt. APPS lieferte aber ein völlig falsches Ergebnis zurück. Somit liegt nur eine CSRS-Lösung vor, deren Qualität der des ersten kinematischen Datensatzes ähnelt. Sie soll hier deswegen nicht im Detail dargestellt werden.

4 Schlussfolgerungen

Alle Dienste überzeugten durch ihre Bedienungsfreundlichkeit und lieferten als kostenlose Anwendungen überwiegend gute Ergebnisse. Liegt das Hauptinteresse in der Auswertung statischer Beobachtungen so haben sich besonders CSRS und APPS mit ihrer Zuverlässigkeit und der Ergebnisgenauigkeit ausgezeichnet. Sollen kinematische Beobachtungen ausgewertet werden, ist derzeit CSRS als einziger Dienst zu empfehlen.

GAPS hatte bis zum Ende des Vergleichszeitraumes gehäuft Probleme in der Datenprozessierung und APPS konnte nicht alle kinematischen Datensätze zuverlässig bearbeiten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei beiden Diensten diese gravierenden Probleme temporärer Natur sind.

Die Genauigkeit der berechneten 3D-Koordinaten lag für „gute“ 1 h-Datensätze im Bereich einiger Zentimeter. Die Ergebnisse der „mittelguten“ 1 h-Datensätze wiesen dagegen insbesondere in der Höhenkomponente größere

Streuungen auf, so dass insgesamt eine Genauigkeit von einem Dezimeter erreicht werden konnte. Bei 24 h-Datensätzen erzielten alle Dienste sehr gute Ergebnisse mit 3D-Genauigkeiten von unter zwei Zentimetern. Die kinematischen Auswertungen erreichten Genauigkeiten von einigen Zentimetern in Nord und Ost und einem Dezimeter in der Höhe.

Es ist davon auszugehen, dass GLONASS-Datenprozessierung in naher Zukunft bei allen Diensten zur Verfügung gestellt wird. Zu hoffen ist, dass die kinematische Auswertung weitere Verbesserungen erfährt und bei allen Diensten genutzt werden kann. Für viele Nutzer wäre es wünschenswert, wenn die Koordinatenergebnisse direkt in ETRS89 ausgegeben werden würden und nicht noch eine eigene Transformation von ITRF05 nach ETRS89 nötig wäre.

Dank

Alle hier getesteten Dienste können kostenfrei genutzt werden. Die meisten dieser Dienste verwenden die präzisen Orbits und Satellitenuhrkorrekturen des *International GNSS Service* (IGS), auf die auch kostenfrei zugegriffen werden kann. Weiterhin konnten die GPS- und GLONASS-Signale verwendet werden, ohne dass an die Systembetreiber etwas bezahlt werden musste. Zu danken ist damit den Steuerzahlern vieler Staaten und auch einzelnen Firmen, die diese Infrastruktur zur allgemeinen Verwendung zur Verfügung stellen.

Ein weiterer Dank gilt dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), welches GNSS-Beobachtungen seines Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiffes Deneb bereitstellte.

Besonders zu danken sind Anja Heßelbarth und Nico Reußner für ihre zahlreichen Verbesserungsvorschläge zu diesem Bericht.

Literatur

- [1] EBNER, R., FEATHERSTONE, W.E. (2008): How well can on-line GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks? *J. of Applied Geodesy*, 2:149-157.
- [2] HESSELBARTH, A. (2009): GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP). *zfv*, 134:278-286.
- [3] KOUBA, J., HÉROUX, P. (2000): GPS Precise Point Positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, 5:12-28.
- [4] KOUBA, J. (2009): A guide to using International GNSS Service (IGS) products. <http://www.igs.org/igs/scb/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
- [5] LEANDRO, R.F., SANTOS, M.C., LANGLEY, R.B. (2007): GAPS: The GPS Analysis and Positioning Software – A Brief Overview. *Proc. ION GNSS 2007*, 1807-1811.
- [6] MIREAULT, Y., TÉTREAULT, P., LAHAYE, F., HÉROUX, P., KOUBA, J. (2008): Online Precise Point Positioning. *GPS World*, Sep. 2008, S. 59-64.
- [7] PIRIZ, R., MOZO, A., NAVARRO, P., RODRÍGUEZ, D. (2008): magicGNSS: Precise GNSS products out of the box. *Proc. ION GNSS 2008*, 1242-1251.
- [8] STADLER, D., SCHRANK, J., WALM, R., MEISSNER, T., FLÖTER, C., BECKER, D., HÖHNE, K., ESCH, M., WANNINGER, L. (2007): Vergleich von Diensten für automatische GPS-Datenauswertung. *Allg. Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 114:34-37.
- [9] ZUMBERGE, J.F., HEFLIN, M.B., JEFFERSON, D.C., WATKINS, M.M., WEBB, F.H. (1997): Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. of Geophysical Research*, 102, B3:5005-5017.

Anschrift der Verfasser:

MARTIN GIESE, JULIANNA KACZKOWSKI, ARMIN LANGE, CHRISTIANE STIEGERT, JULIANE WIEGRATZ, PAWEŁ ZAKRZEWSKI, LAMBERT WANNINGER
Geodätisches Institut
Technische Universität Dresden
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden
E-Mail: lambert.wanninger@tu-dresden.de