

Leistungsfähigkeit von Einfrequenz-GNSS-Empfängern

Single Frequency GNSS Receiver Capability

Werner Stempfhuber, Jürgen Alberding

Seit der Einführung der GNSS-Echtzeitverfahren (RTK) und der flächendeckenden Verfügbarkeit von GNSS-Korrekturdiensten stellen GNSS-Empfänger die zentrale Messtechnik im Vermessungswesen dar. Neben den klassischen Aufgaben der Ingenieur Anwendung dient das satellitengestützte Verfahren für viele weitere Spezialgebiete als Navigations- oder Referenzierungssystem. Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen werden im Vermessungswesen für Echtzeitanwendungen noch relativ teure GNSS-Empfänger mit Mehrfrequenz-Technologie verwendet. Seit kurzer Zeit sind einzelne L1-Boards auch mit integriertem RTK-Algorithmus erhältlich. Mit dieser angepassten GNSS-Technologie bei L1-Empfängern wird sich das Verfahren für zahlreiche Anwendungen im Vermessungswesen, im Bauwesen und in den Geowissenschaften signifikant verbreiten. Bei einer guten Performance des Chips inkl. des optimierten RTK-Algorithmus und geeigneten GNSS-Antennen ist ein solches Low-Cost-System eine attraktive Alternative zu den konventionellen Mehrfrequenz-GNSS-Empfängern. In diesem Beitrag werden erste Testergebnisse zur Leistungsfähigkeit von Low-Cost-L1-GNSS-Empfängern dargestellt und ausgewählte Beispiele diskutiert.

Schlüsselwörter: RTK, GNSS, L1-Einfrequenz-Empfänger, Low-Cost, Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung

Since the introduction of the GNSS real-time processes (RTK) and the wide availability of GNSS reference services, GNSS receivers represent the central measurement technology in the surveying sector. In addition to the traditional tasks of engineering applications, the satellite-supported process serves many other specialisations as a navigation or reference system. On account of the accuracy standards, still relatively expensive GNSS receivers with multi-frequency technology are used in the surveying sector for real-time applications. It is only recently that individual L1 boards with an integrated RTK algorithm have also been available. With this adapted GNSS technology for L1 receivers, the processes will significantly widen for numerous applications in the surveying sector, civil engineering and earth sciences. With a solid performance of the chip including the optimised RTK algorithm and suitable GNSS aeriels, such a low-cost system is an attractive alternative to the conventional multi-frequency GNSS receivers. In this contribution, the first test results regarding the capacities of low-cost L1 GNSS receivers are shown and selected examples are discussed.

Keywords: RTK, GNSS, L1 single frequency receiver, low-cost, ambiguity fix

1 EINLEITUNG UND STAND DER TECHNIK

Die Vermessung mittels GNSS (Global Navigation Satellite System) hat in den letzten zwei Jahrzehnten unser Berufsbild erheblich verändert. Die Landesvermessung stellt den Raumbezug inzwischen aktiv über einen GNSS-Korrekturdatendienst (Referenzdienst) zur Verfügung. Durch die Verwendung der GNSS-Technik (Rover- und Referenzinformationen; in Deutschland z.B. durch

SAPOS (Satellitenpositionierungsdienst der Vermessungsverwaltungen der Länder)) kann sich der Vermesser mit einem RTK-Empfänger (Real-Time Kinematic) im amtlichen Bezugssystem der Landesvermessung zentimetergenau positionieren. Anwendungen der Katastervermessung, verschiedene Aufgaben der Ingenieurgeodäsie, die Georeferenzierung bei Geoinformationsanwendungen, der

Fokus auf Präzision ...

Photogrammetrie bzw. bei UAV-Anwendungen (Unmanned Aerial Vehicle) sowie bei der Registrierung von Laserscandaten sind nur wenige Beispiele.

Bei den verschiedenen Bereichen der Navigationsaufgaben in der Baumaschinensteuerung und bei Precision-Farming-Anwendungen werden nahezu ausschließlich RTK-GNSS-Verfahren zur Führung bzw. zur autonomen Maschinensteuerung eingesetzt. Geodätische Monitoringverfahren verwenden in der Regel ebenfalls GNSS-Positionen für die Überwachung von geometrischen Veränderungen. In der Geoinformation werden gegenwärtig meist GPS-/GNSS-Empfänger mit SBAS-Korrekturen (Satellite Based Augmentation System) für die Lokalisierung von Sachdaten im geringeren Genauigkeitsbereich eingesetzt.

Während für Anwendungen im Geomonitoring bereits Low-Cost-L1-Empfänger verwendet werden, finden im geodätischen Bereich gegenwärtig nahezu alle Messungen im genauen Anwendungsbereich mit Mehrfrequenz-Empfängern statt. Diese aufwendigen und komplexen Gesamtsysteme bieten in den aktuellen Ausführungen viele Funktionen für den täglichen Vermessungsbereich. Verschiedene Hersteller bieten für individuelle Vermessungsaufgaben angepasste GNSS-Gesamtsysteme an. Der hohe Anschaffungspreis schränkt die Verwendung der Messtechnologie jedoch für einen breiten Massenmarkt ein.

Die Verfügbarkeit von Low-Cost-L1-GNSS-Empfängern mit RTK-Funktionalität wird in naher Zukunft zu einer umfassenden Verbreitung der RTK-Verfahren führen (siehe z. B. <http://gpsworld.com/u-blox-brings-gnss-rtk-precision-to-the-mass-market/>). In Zukunft werden für klassische Vermessungsverfahren (Aufnahme, Absteckung und Georeferenzierung) und vor allem für genaue Navigationsaufgaben immer häufiger Einfrequenz-Empfänger mit verwendeter L1-Trägerphase in Echtzeit eingesetzt. Zentimetergenaue RTK-Positionsinformationen werden auch bei L1-Empfängern im standardisierten NMEA-Format (National Marine Electronics Association) bereitgestellt. Somit können die Empfänger ohne Schnittstellenanpassung verwendet werden.

2 ALLGEMEINE GNSS-SYSTEMKOMPONENTEN

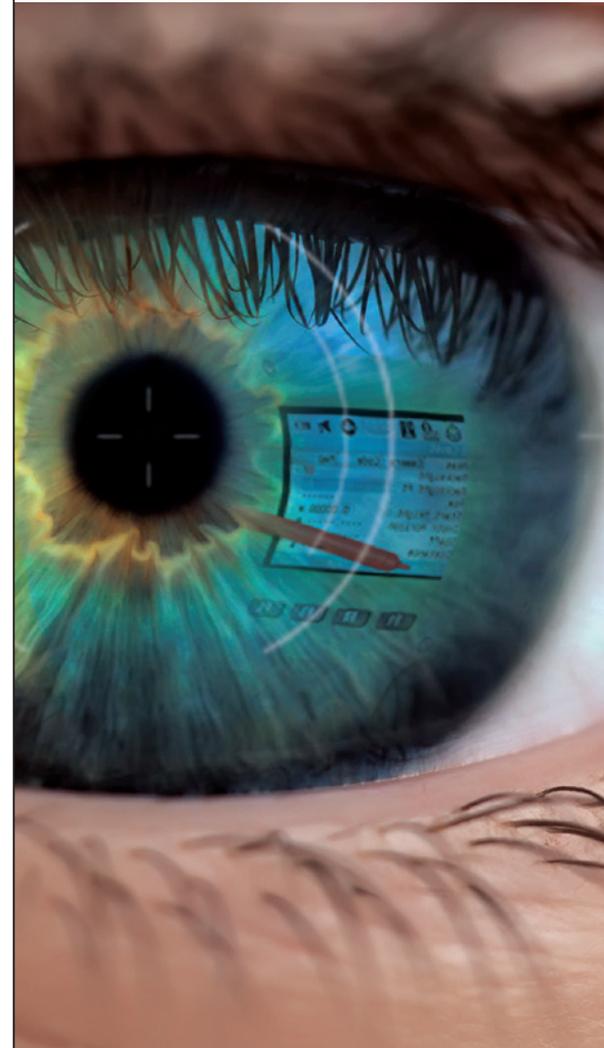
Im nachfolgenden Abschnitt werden die wesentlichen Systemeigenschaften für die Verwendung von Einfrequenz-Empfängern aufgeführt. Dies sind neben den eigentlichen Empfänger-Boards mit bis zu 72 Kanälen zur GNSS-Signalerfassung die GNSS-Antennen, Hard- und Softwareschnittstellen inkl. der Telemetrie zur Übertragung der RTCM-Korrekturdaten (Radio Technical Commission for Maritime Service), Konfigurationsinterface, Datenspeicherung, Stromversorgung und vor allem der angepasste RTK-Algorithmus zur Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung. Die genaue Abstimmung der entsprechenden Komponenten mit der On-Board-Firmware ist für ein leistungsfähiges Gesamtsystem ausschlaggebend. Die L1-GNSS-Board-Hersteller (u. a. NVS und uBlox) bieten keine Gesamtsysteme für den praktischen Vermessungseinsatz mit den genannten Komponenten an.

2.1 Gegenwärtige GNSS-Satelliten

Für die genaue Positionsbestimmung aus jeweils einer Frequenz von GNSS-Signalen stehen die Informationen in *Abb. 1* zur Verfügung.

2.2 Empfängermodule und Berechnungsalgorithmen

Seit einigen Jahren sind kostengünstige L1-Empfänger-Boards mit der Ausgabe der Code- und Trägerphasen-Rohdaten verfügbar. In den letzten Jahren wurden verschiedene wissenschaftliche Arbeiten zur Leistungsfähigkeit der statischen Basislinienauswertung publiziert, z. B. /Zhang 2016/. Für die Auswertung von Rohdaten können



... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Automatisierte Funktionen und eine branchenführende Genauigkeit von 0,2 mm mit Standard Invar-Nivellierlatten liefern höchste Präzision.

Mit nur einem Tastendruck werden vor jeder Messung automatisierte Neigungsprüfungen durchgeführt. Dank dem integrierten Autofokus wird nicht nur Ihr Ziel schneller erfasst, sondern auch die Messgenauigkeit erhöht, indem der Kontrast der Latte maximiert wird.

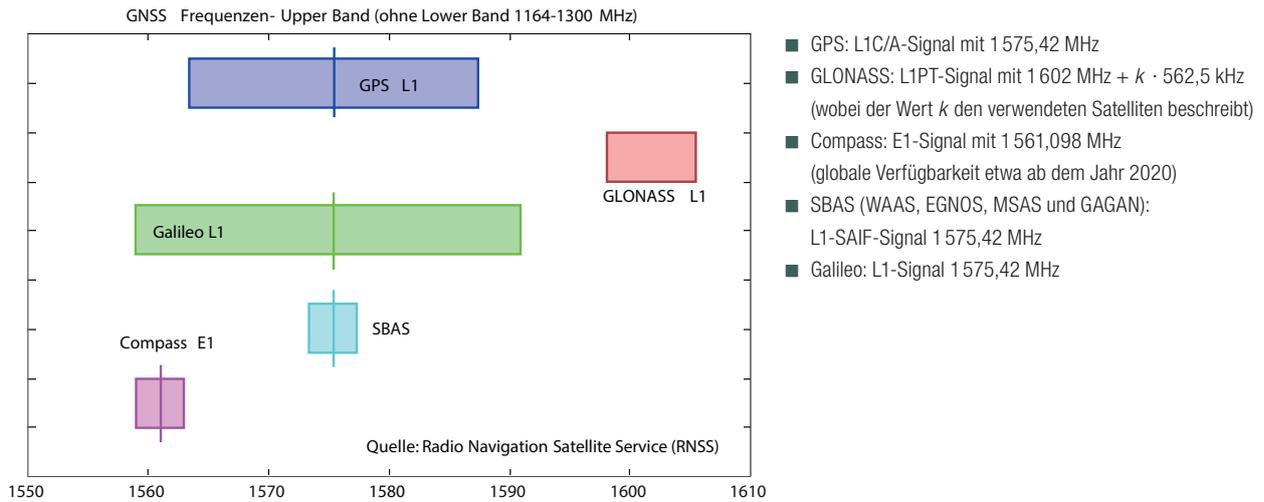


Abb. 1 | GNSS Upper Band (Wellenlänge < 20 cm)

unterschiedliche kommerzielle, wissenschaftliche oder Open/Source-Programme (u. a. RTKLib, <http://www.rtklib.com>) verwendet werden. Der Einsatz von Echtzeitanwendungen mit L1-Empfängern beschränkte sich bisher auf den RTKNav-Algorithmus aus RTKLib /Takasu 2009/, /Stempfhuber 2013/. Die Methode der Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung basiert dabei auf den Integer-Ambiguity-Estimation-Ansatz /Takasu 2009/. In RTKNav wurden die Echtzeitschnittstellen aus verschiedenen L1-Boards implementiert. Diese OEM-Boards müssen für den Einsatz auf einem Microcontroller integriert werden. An der Beuth-Hochschule wurde dies mit verschiedenen GNSS-Boards auf den Arduino-Microcontrollern (Typ Uno und Due) realisiert. Neben der für den Feldeinsatz ungeeigneten PC-Version existieren eine ältere Android-Version (RTKGPS+, in verschiedenen App-Stores erhältlich) und verschiedene embedded-Lösungen (in unterschiedlichen Microcontrollern eingebundener RTKNav-Algorithmus, z. B. Emlid Reach, <https://docs.emlid.com>, oder Drotek <https://drotek.com>). Aus Untersuchungen ist hervorge-

gangen, dass die Leistungsfähigkeit nur bedingt für Praxisanwendungen geeignet ist /Stempfhuber 2011/.

Weitere Forschungsarbeiten behandeln die Entwicklung von eigenständigen RTK-Algorithmen (z. B. /Eling et al. 2015/). Zwar werden bei diesen Arbeiten entsprechende Zusatzsensoren integriert, die RTK-Mehrdeutigkeitslösung beschränkt sich jedoch nur auf die Auswertung der GPS-Signale. Solche Arbeiten kämpfen immer mit den rasanten Produktentwicklungen inkl. der stetigen Optimierung durch RTK-Firmware-Updates der Board-Hersteller. Für Hersteller von geodätischen Mehrfrequenz-Empfängern erschließt sich dieser Low-Cost-Markt bisher nicht.

In diesem Beitrag werden die beiden L1-GNSS-Empfänger der Firma uBlox (<http://www.u-blox.com>) und NVS (<http://www.nvs-gnss.com>) genauer betrachtet. Beide Empfänger können Rohdaten aufzeichnen und haben zusätzlich einen implementierten RTK-Algorithmus auf dem Empfänger-Board (On-Board). Die Ausgabe der Echtzeitposition erfolgt im standardisierten NMEA0183-Format. Die verfügbaren Evaluation Kits (EVK) ermöglichen dem Anwender

uBlox: C94-M8P-Board (72 GNSS-Kanäle):

- GPS: L1C/A (1 575,42 MHz)
- GLONASS: L10F (1 602 MHz + $k \cdot 562,5$ kHz;
 k ist die Satellitenfrequenz-Nr., ($k = -7, -6, \dots, 5, 6$))
- Compass: B1I (1 561,098 MHz)
- SBAS-Messfrequenz: GPS & GLONASS RTK 5 Hz und Rohdatenspeicherung 10 Hz



NVS: NV08C-RTK (32 GNSS-Kanäle):

- GPS: L1C/A (1 575,42 MHz)
- GLONASS: L10F (1 602 MHz + $k \cdot 562,5$ kHz;
 k ist die Satellitenfrequenz-Nr.)
- SBAS-Messfrequenz GPS & GLONASS RTK 10 Hz und Rohdatenspeicherung 20 Hz



Abb. 2 | Spezifikation der L1-GNSS-Empfänger-Boards uBlox und NVS (EVK)

schnelle und unkomplizierte Tests zur Leistungsfähigkeit dieser Empfänger. Die Stromversorgung und Datenkommunikation erfolgt über USB-Ports. Für den praktischen Feldeinsatz sind diese EVK ungeeignet.

Die wesentliche Stärke der beiden L1-GNSS-Empfänger ist, neben dem geringen Preis, der von den Board-Herstellern implementierte RTK-Algorithmus. Dabei kann das RTCM-Protokoll der Version 3 zur Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung in Echtzeit verwendet werden. Somit ist der bisherige Ansatz aus RTKNavio obsolet. Die Board-Hersteller empfehlen die Verwendung von geeigneten L1-Antennen (siehe Spezifikation in den entsprechenden Datenblättern). Das White Paper /uBlox 2016/ zum uBlox-C94-M8P-Board hebt den Einfluss der L1-GNSS-Antenne für die Initialisierung (Time-To-First-Ambiguity-Fix, TTFAF) und die Stabilität der Trägerphasen-Mehrdeutigkeit hervor. Die im Beitrag dargestellten GNSS-Untersuchungen wurden mit der Tallysman-Antenne (Typ 32-4421-00-3000) durchgeführt. Die Verwendung von Choke-Ring-Adaptoren minimiert vor allem bei Langzeitbeobachtungen (z. B. in Monitoringanwendungen) störende Multipath-Effekte.

2.3 Korrekturdienste

Hochgenaue GNSS-Basislinienauswertungen benötigen Code- und Phasenkorrekturdaten (im Post-Processing-Format RINEX (Receiver Independent Exchange Format), bei RTK-Anwendungen meist RTCM SC-104, Version 3.0 bzw. 3.1) von einer lokalen Referenzstation oder aus einem Referenznetzwerk. Hierzu sind Dienste von Vermessungsbehörden (z. B. SAPOS, SwiPOS oder APOS) und firmenspezifische Lösungen verfügbar. Neben internationalen PPP-Portalen (Precise Point Positioning) existieren auch immer mehr nationale PPP-Dienste. Ein automatisierter Zugriff auf die Server (z. B. für Monitoringlösungen) ist zum größten Teil nur sehr eingeschränkt möglich. Die meisten Korrekturdienste bieten neben der Rohdatenabgabe zusätzlich RTK-Dienste an. Dabei werden die RTCM-Daten über das bekannte Ntrip-Verfahren (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) verteilt. Der Nutzer hat dabei die Auswahl zwischen Korrekturen im VRS- oder MAC-Verfahren (Virtual Reference Station/Master-Auxiliary Concept). Für den L1-Einsatz bewirken Code- und Trägerphasen-Korrekturen im Verfahren der virtuellen Referenzstation ideale Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösungen. In Deutschland sind u. a. folgende RTK-Korrekturdienste verfügbar:

- SAPOS HEPS (<http://www.sapos.de>),
- Trimble VRSNow (<http://www.trimble.com/Positioning-Services/VRS-Now.aspx>),
- Leica SmartNet (http://w3.leica-geosystems.com/de/SmartNet_95099.htm),
- Claas RTK-Netz (<http://app.claas.com/2013/lenksysteme/de/rtk-net.php>),
- Maschinenring RTK-Netz (<https://www.maschinenring.de/rtk>),
- RTK Clue Reichard (<https://rtk-clue.com/Funktionsprinzip.html>),
- ascos (<http://www.axio-net.eu/>), in Zukunft zusammen mit Trimble, sowie
- Starfire John Deere RTK (<http://www.deere.com>).

Globale Korrekturdatendienste basieren vorwiegend auf dem PPP-Ansatz. Nach einer Initialisierungszeit von etwa 15 bis 25 Minuten



Abb. 3 | Funktionalität und Schnittstellen des A07 /Alberding 2016/

können mit Mehrfrequenz-Empfängern ohne die direkte Verbindung zu physikalischen GNSS-Referenzstationen weltweit Genauigkeiten < 5 cm in Abhängigkeit der IGS-Referenznetzverteilung (International GPS Service) erreicht werden. Dieses Verfahren bietet sich insbesondere für den Offshore-Bereich, in Gebieten ohne RTK-Dienste oder auch in der Landwirtschaft an. Da die PPP-Konvergenzzeiten bei L1-Empfängern deutlich höher sind, werden die globalen Ansätze in diesem Beitrag nicht weiter betrachtet. Eine wesentliche Voraussetzung für die weitere Verbreitung der L1-RTK-GNSS-Technologie ist die Verfügbarkeit flächendeckender und kostengünstiger Korrekturdatendienste.

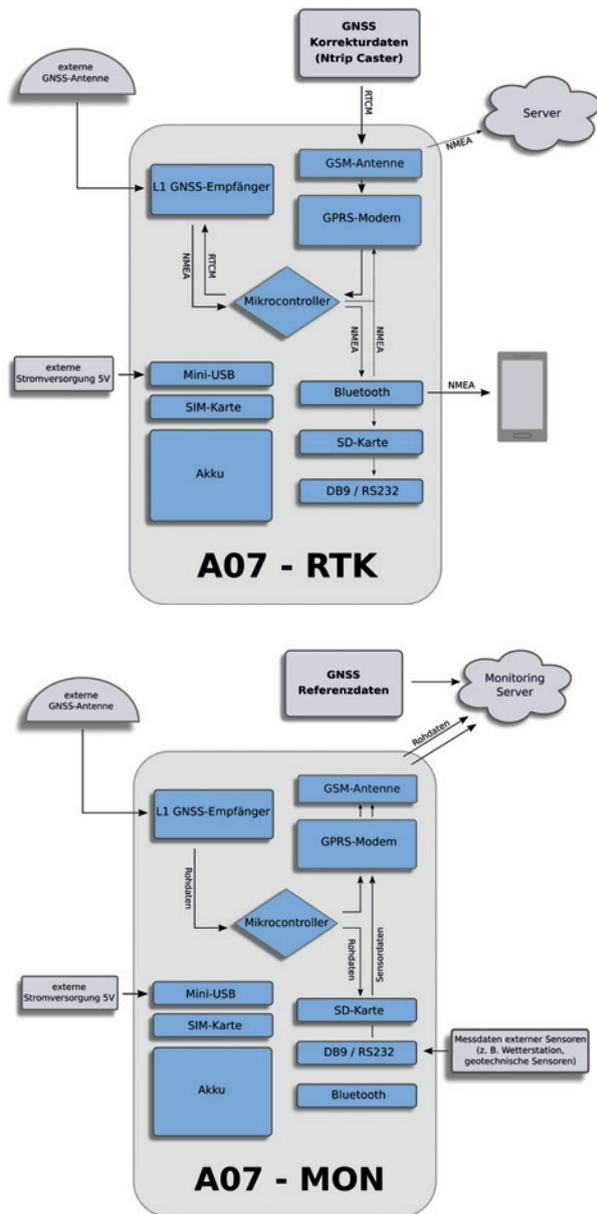


Abb. 4 | Datenfluss beim A07-RTK und A07-MON /Alberding 2016/

3 TELEMETRIE- UND POSITIONIERUNGSSYSTEM ALBERDING A07

Die Firma Alberding GmbH hat mit der Plattform des A07-Telemetrie- und Positionierungssystems (http://www.alberding.eu/de/A07_NAV.html) alle erforderlichen Komponenten für den praktischen Feldeinsatz in einem Gesamtsystem vereint. Der GNSS-Chip ist gemeinsam mit einem GPRS-Modem, einer GSM-Antenne, einem Lithium-Polymer-Akku, einer Speicherkarte und einem Bluetooth-Modul in einem robusten Gehäuse integriert. Das Herzstück des A07-Sensors ist ein Prozessor, welcher Berechnungen durchführt und das Datenmanagement übernimmt. Optional sind INS-Low-Cost-Komponenten auf dem Board verfügbar.

Für Vermessungsanwendungen wird der A07 derzeit in den Versionen A07-MON für Monitoring- und Fast-Static-Anwendungen und A07-RTK für Echtzeitanwendungen angeboten. Beide Systeme unterscheiden sich derzeit im Wesentlichen nur durch den GNSS-Chip, wobei im A07-MON die NV08C-CSM-Chips der Firma NVS Technologies AG und im A07-RTK die NEO-M8P-Chips der Firma uBlox AG integriert sind. Weiterhin werden beim A07-MON standardmäßig die serielle RS232-Schnittstelle und der zusätzliche externe GSM-Antennenanschluss bereitgestellt. Der interne Datenfluss wurde auf die jeweiligen Anforderungen optimiert. Bei beiden Systemen werden präzise Low-Cost-GNSS-Antennen der Firma Tallysman (<http://www.tallysman.com/index.php/gnss/products>) verwendet.

3.1 A07-RTK

Für Echtzeitanwendungen nutzt der A07-RTK das Ntrip-Protokoll (mobiles Internet) zum Empfang der GNSS-Korrekturdaten. Über die Konfigurations-App werden die Adresse und die Zugangsdaten des Korrekturdatenservers (Ntrip-Caster) vorkonfiguriert. Nach dem Einschalten baut der A07-RTK automatisch die Verbindung zum Server auf, empfängt die Korrekturdaten, leitet diese an den GNSS-Chip weiter und empfängt wiederum vom GNSS-Chip die auf dem On-Board-Algorithmus berechneten RTK-Positionen mit der entsprechenden Genauigkeitsangabe im NMEA-Datenformat.

Je nach Anwendungsfall kann der A07-RTK die Echtzeitpositionen kabellos über Bluetooth an ein externes Gerät (z. B. Smartphone, Tablet-PC bzw. Maschinensteuerungsrechner) oder über mobiles Internet an einen anderen Server (z. B. genaue Fahrzeugortung) übertragen.

Auch eine kabelgebundene Datenübertragung (RS232, USB) oder die interne Rohdatenspeicherung der GNSS-Beobachtungen ist möglich. Bei Vermessungsaufgaben, wie die Aufnahme und Absteckung von Punkten sowie GIS-Anwendungen, komplettiert die unter dem Betriebssystem Android laufende AGIS- und AGPS-Software das Gesamtsystem.

3.2 A07-MON

Bei Monitoringanwendungen im Near-Online-Verfahren (d. h. automatisierte Basislinien-Auswertung unmittelbar nach der Rohdatenaufzeichnung) werden die Messdaten des L1-GNSS-Empfängers zunächst im A07 (A07-MON oder A07-RTK) gespeichert und in definierten Abständen in Dateiform zum Monitoringserver übertra-

Fokus auf Datenfluss ...

gen. Auf dem Server laufen die Daten aller Sensoren zusammen und werden in unterschiedlichen Intervallen (z.B. 1 h, 12 h, 24 h) mit der Software WA01 (<http://www.wasoft.de>) im Basislinienverfahren mit den Daten der GNSS-Referenzstation prozessiert. Die webbasierte Visualisierung der Zeitreihen erfolgt in der Monitoringsoftware. Alarmierungen beim Überschreiten definierbarer Grenzwerte können automatisiert via E-Mail und SMS an einen definierbaren Nutzerkreis verschickt werden.

In Verbindung mit Wetterstationen und/oder geotechnischen Sensoren wird die A07-Plattform zusätzlich auch als Telemetrie-Modul verwendet. Die Daten der externen Sensoren werden über die serielle Schnittstelle des A07 eingelesen, zwischengespeichert, gemeinsam mit den GNSS-Rohdaten an den Server übertragen und in der Monitoringsoftware visualisiert. Das A07-Monitoringsystem wird seit etwa zwei Jahren von unterschiedlichen Kunden erfolgreich eingesetzt. In der Konfiguration mit Solarstromversorgung wird das System auch autark als permanenter Messwertgeber im Feld betrieben. Gegenüber optischen Verfahren hat der GNSS-Ansatz Vorteile in der nicht benötigten direkten Sichtverbindung zwischen Referenzstation und den Sensoren.

3.3 Referenzstationen und Korrekturdaten für den A07

Sowohl im RTK-Verfahren als auch beim Near-Online-Verfahren werden die Messdaten des L1-GNSS-Empfängers im differenziellen Trägerphasenverfahren relativ zu einer physikalischen oder virtuellen GNSS-Referenzstation prozessiert. Das Ergebnis der 3D-Positionsbestimmung aus den GNSS-Rohdaten ist der Raumvektor zwischen dem L1-Antennenphasenzentrum des Rovers und der Referenzstation. Beim Betrieb einer eigenen GNSS-Referenzstation ist zumindest bei Vermessungsanwendungen darauf zu achten, dass die Position der Referenzantenne im Landesbezugssystem bekannt ist.

Der A07-RTK kann Korrekturdaten im international standardisierten RTCM-3-Datenformat verarbeiten. Der überwiegende Teil der im Abschnitt 2.3 aufgeführten Korrekturdatendienste unterstützt das RTCM-3-Format, sodass aus technischen Erwägungen der Betrieb einer eigenen GNSS-Referenzstation nicht erforderlich ist.

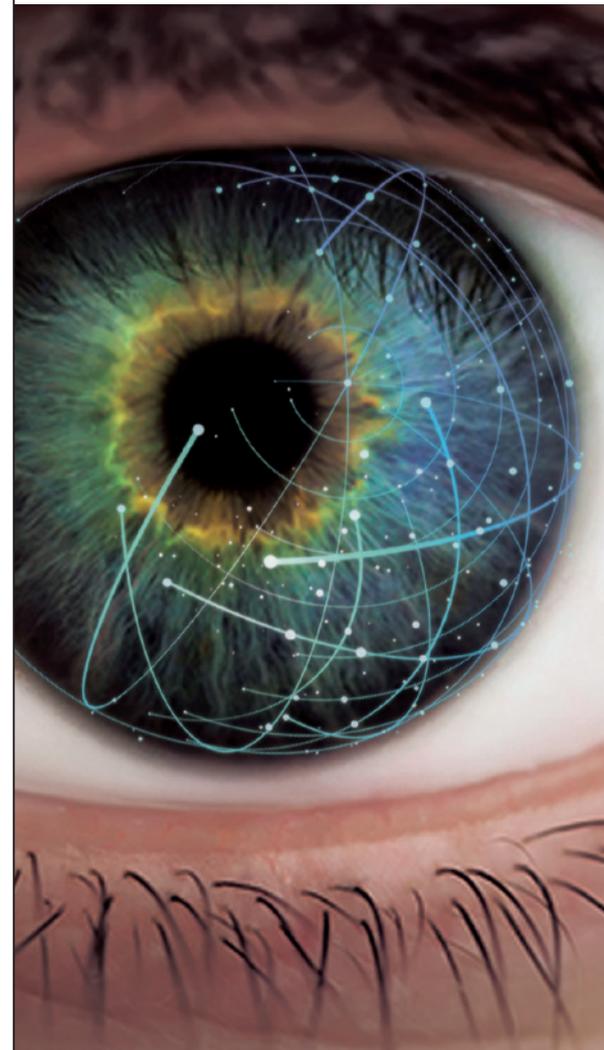
Derzeit bieten die RTK-Dienstbetreiber unterschiedliche Kostenmodelle an, die bei Verwendung teurer Zweifrequenz-Technik im Verhältnis zum Anschaffungspreis wenig ins Gewicht fallen. In Verbindung mit einem L1-Low-Cost-RTK-Empfänger kann ein Korrekturdatenabonnement pro Jahr im Bereich des Anschaffungspreises der Hardware liegen. Da die L1-RTK-Empfänger nur das L1-Signal nutzen, könnte auch ein zweiter L1-Low-Cost-Empfänger als eigene Basisstation verwendet werden. Es wird für den Kunden dazu ein entsprechendes Portal zur Nutzung der eigenen Basisdaten über das Ntrip-Verfahren angeboten.

Für das Geomonitoring sind ebenfalls bestehende GNSS-Referenzdienste nutzbar. Die Messdaten der GNSS-Referenzstationen werden vom Serviceanbieter (z.B. SAPOS) in RINEX-Dateien gespeichert und über einen gewissen Zeitraum zum Download vorgehalten. Alternativ können auch die Real-Time-Datenströme in RINEX-Dateien konvertiert und für den eigenen Gebrauch verwendet werden.

Aufgrund der Langzeitüberwachung mit mehreren GNSS-Sensoren und logistischen Überlegungen ist bei Monitoringanwendungen der Betrieb eigener Referenzstationen wirtschaftlicher als die Nutzung kostenpflichtiger Korrekturdienste. Bei ingenieurgeodätischen Genauigkeitsanforderungen sollte der Abstand zwischen GNSS-Referenzstation und Sensoren möglichst gering (< 1 km) sein.

4 ANWENDUNGEN UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT VON EINFREQUENZ-GNSS-SYSTEMEN

Positionsauswertungen von L1-GNSS-Systemen eignen sich für die Bestimmung und Kontrolle von statischen Punktbetrachtungen bei geodätischen Standardanwendungen und bei RTK-Messungen. Darüber hinaus gibt es in Zukunft viele weitere Beispiele von



... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Der Bedienkomfort der neuen Leica Digitalnivelliere endet nicht im Feld. Nach der einfachen Übermittlung Ihrer Daten ins Büro werden sie dort von der Leica Infinity Büro-Software mühelos verarbeitet. Diese intuitive Software sorgt für eine leicht verständliche Darstellung komplexer Nivellierdaten.

Kombinieren Sie Tabellen mit Grafiken oder führen Sie sogar Quervergleiche von Projektdaten in einem Fenster durch, um eine Gesamtübersicht über Nivellimentlinien, Linienberechnungen oder Ausgleichungen zu erhalten.

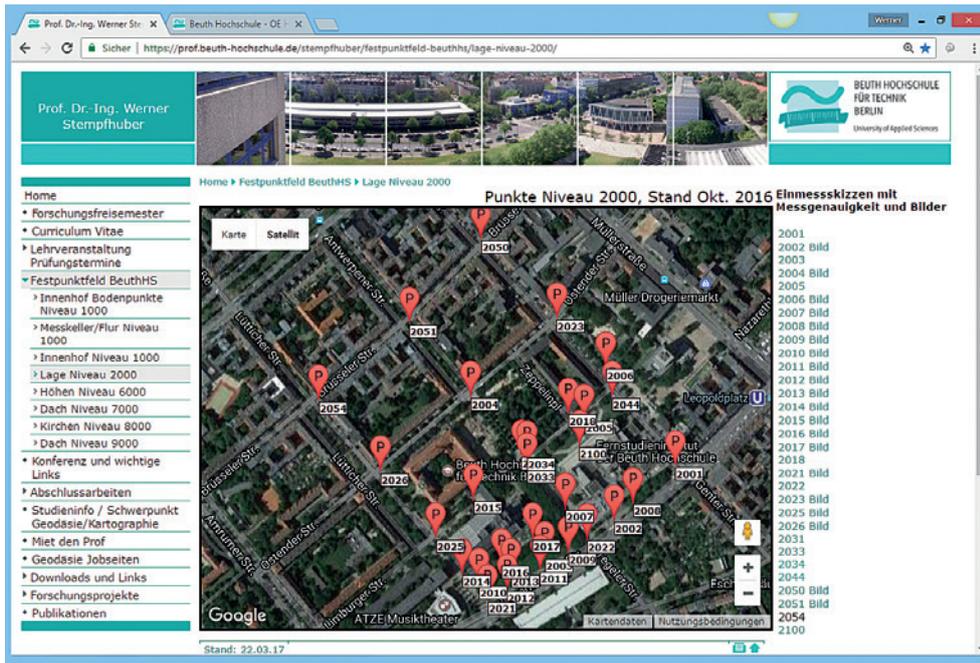


Abb. 5 | Festpunktfeld an der Beuth-Hochschule für Technik Berlin (Verwendung der Google API (<https://prof.beuth-hochschule.de/stempfluber/festpunktfeld-beuthhs/lage-niveau-2000/>))

Low-Cost-Anwendungen abseits der Geodäsie (z. B. das autonome Fahren mit zuverlässigen und präzisen Positionsinformationen im Zentimeterniveau).

In den 1990er-Jahren hat sich der Begriff Fast Static in der GPS-Technologie etabliert. Das Ziel dieses Verfahrens ist es, aus kurzen Beobachtungsreihen von Rohdaten eines statisch aufgenommenen Punkts zentimeter- und auch millimetergenaue Absolutpositionen zu bestimmen. Viele wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich nur mit uBlox-Empfängern älterer Generationen (GPS-Empfänger). Die Untersuchungen an der Beuth-Hochschule wurden mit den genannten uBlox- und NVS-Boards mit GNSS-Signalen durchgeführt. Mit dem Empfänger A07 (NVS NV08C CSM) wurden u. a.

im Stadtgebiet von Berlin Rohdaten aufgenommen und ausgewertet. Dabei kamen die Softwareprodukte Wanninger-Software WA01, Trimble TBC Version 3.70 und RTKPost Version 2.4.3 aus RTKLib zum Einsatz. Alle Algorithmen konnten die Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten bei kurzen Beobachtungsreihen (5 min–10 min.) im abgeschatteten Bereich lösen. Als Referenz diente das genaue ETRS89-Festpunktfeld der Beuth-Hochschule für Technik Berlin.

Für die Festpunkte 2022, 2023, 2026 und 9010 wurden zunächst mit dem A07 Rohdaten für 60 min. aufgenommen. Als Referenzstationen wurden die drei SAPOS-Stationen 0896 (~6,8 km), 0897 (~5,2 km) und 0898 (~22,5 km) verwendet. Um effiziente und kostengünstige Auswertungen von Rohdaten durch-

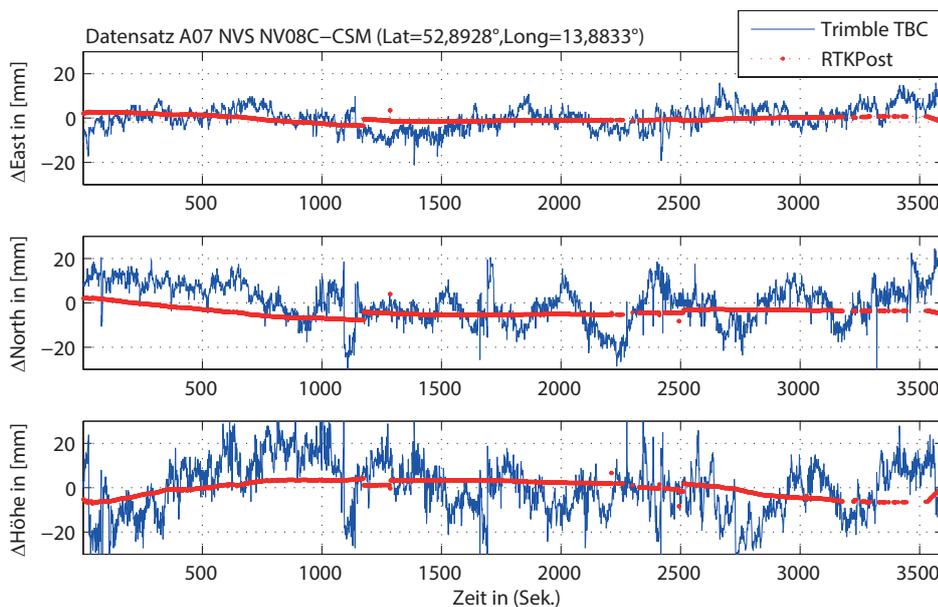


Abb. 6 | Auswertung einer Messreihe des A07 mit zwei unterschiedlichen Auswertepaketen (Verwendung der SAPOS-Daten mit virtueller Referenzstation)

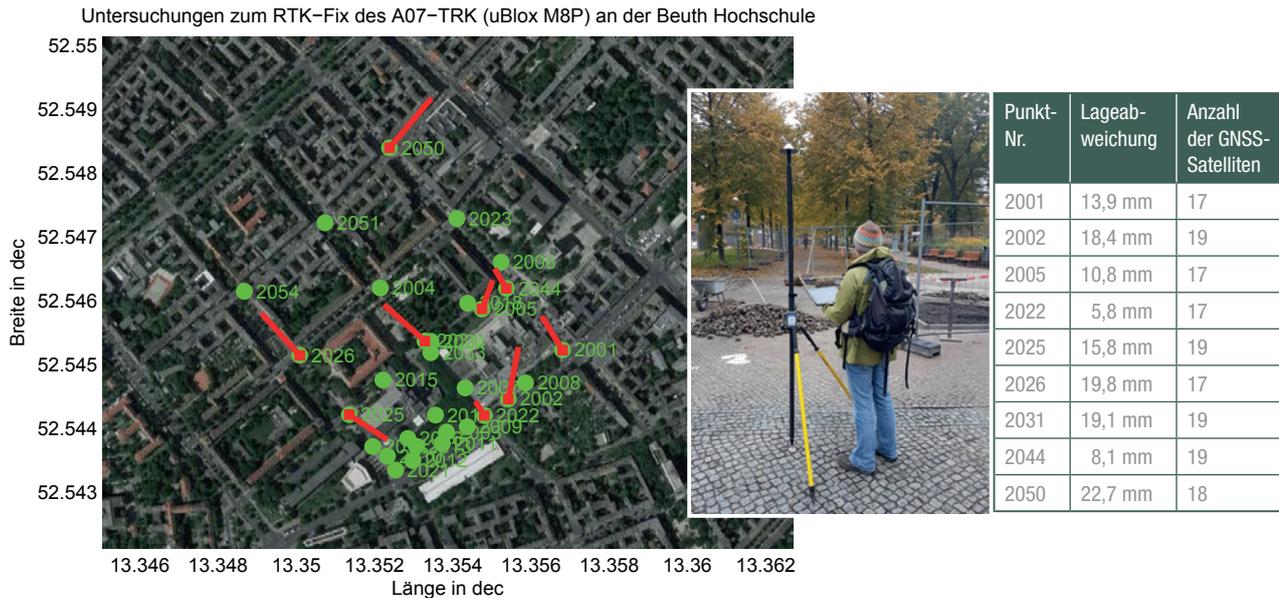


Abb. 7 | Untersuchung der RTK-Mehrdeutigkeitslösung am Festpunktfeld der Beuth-Hochschule im städtischen Bereich, TTF AF innerhalb 5 min., A07-RTK-Empfänger mit uBlox-NEO M8T-Board (Firmware Okt. 2016)

zuführen, bietet sich die Verwendung des Open-Source-Programms RTKLib an. Mit der aktuellen Version können die binären NVS-Rohdaten in das RINEX-Format umgewandelt und die 3D-Position mit RTKPost berechnet werden. Der Prozess der Konvertierung und der Basislinienberechnung lässt sich sehr gut durch die Anwendung von Batch-Prozessen automatisieren. Der Nachteil besteht in der Berechnung von immer nur einer Basislinie aus Referenz und Rover.

Durch die großen Abschattungen konnte nicht für jede Epoche die Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten gelöst werden. Die beiden Programme Trimble TBC und Wanninger-Software WA1 hatten keine Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung. Für die lange Basislinie zum 0898 von 22,5 km mussten die Datensätze etwa 20 min. Beobachtungsdauer aufweisen. Die Genauigkeiten aller Auswertungen lagen nach der Trägerphasen-Mehrdeutigkeitslösung innerhalb einer Grenze von $2\sigma = \pm 1,5$ cm.

In einer weiteren Auswertung wurde u. a. ein A07-Datensatz von 60 min (Verwendung der virtuellen Referenzstation aus dem SAPOS-Netz Brandenburg) mit TBC und RTKPost als Vergleich mit identischen Eingangsdaten prozessiert. Der absolute Positionsunterschied der beiden Basislinienberechnungen beträgt 2 mm. Abb. 6 zeigt das unterschiedliche Rauschen der A07-Rohdaten durch GNSS-Auswertungen mit den beiden unterschiedlichen Programmen.

4.1 RTK-Anwendungen

Die differenzielle RTK-Auswertung erfordert bei L1-Anwendungen kurze Basislinien für eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung. Die TTF AF-Initialisierung sollte bei realistischen Praxisanwendungen innerhalb von etwa 180 Sekunden erfolgen und bei normalen Bedingungen die Mehrdeutigkeitslösung nicht verlieren. Dies ist durch die Verwendung der L1-Code- und Trägerphase bei Low-

Cost-Empfängern in Kombination mit geeigneten Antennen und einen optimierten RTK-Algorithmus für den Zentimeter-Genauigkeitsbereich möglich. Der A07-RTK-Empfänger wurde für diese Anforderungen entsprechend untersucht. Er stellt eine signifikante Verbesserung zu der Option des LEA M8T mit dem RTKNav-Algorithmus dar und bestätigt somit die Vergleichbarkeit mit geodätischen Mehrfrequenz-Empfängern.

Im aktuellen uBlox White Paper /uBlox 2016/ wurde die Initialisierung mit der uBlox ANN-Antenne und der NovAtel NOV-704-WB-Antenne getestet. Die TTF AF-Initialisierung lag dabei innerhalb 180 Sekunden.

4.2 Ergebnisse geodätischer und geotechnischer Monitoringsysteme

Seitdem die Low-Cost-GNSS-Board-Hersteller Modellversionen mit Rohdatenschnittstelle anbieten, wurde deren möglicher Einsatz für hochgenaue Anwendungen in zahlreichen Forschungsprojekten untersucht. Neben dem geringen Empfängerpreis liegen die Vorteile der L1-Empfänger im kleinen Formfaktor (z. B. uBlox NEO M8P $12,2 \times 16,0 \times 2,4$ mm) und im geringen Stromverbrauch. Erste Testmessungen haben gezeigt /Stempfhuber & Alberding 2012/, dass die Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten mit dem Low-Cost-Empfänger über kurze Basislinien (< 2 km) und mit Messzeiten von 15–30 Minuten zuverlässig gelöst werden konnten. In Abhängigkeit der Beobachtungsbedingungen konnten mit geeigneten Antennen Genauigkeiten im Bereich von 1 cm in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen erzielt werden.

Die Alberding GmbH war einer der ersten Firmen, die Low-Cost-GNSS-Module zusammen mit anderen wichtigen Komponenten wie die Datenübertragung, die Speicherung und Erfassung von Zusatzdaten in einer Systemlösung integriert und deren Funktionalität auf

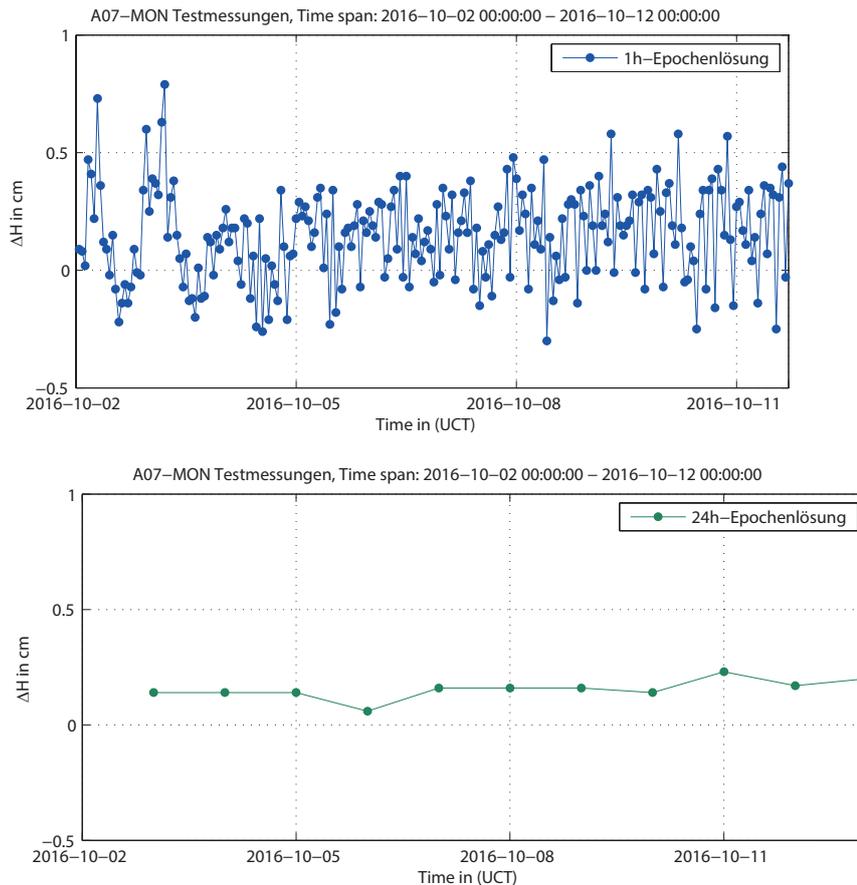


Abb. 8 | GNSS-Auswertungen des A07-MON in der Monitoringsoftware

geodätische und geotechnische Monitoringanwendungen optimierte. Inzwischen liefern autark operierende A07-MON-Systeme seit etwa zwei Jahren in verschiedenen Projekten stündlich bei jedem Wetter genaue Informationen über Punktveränderungen. Die Vorteile des Systems liegen im verhältnismäßig günstigen Systempreis, in dem GNSS-Messverfahren an sich und der einfachen Installation mit durchgängigem Datenfluss bis hin zum Monitoringserver.

Aufgrund des sparsamen Umgangs mit der Batteriekapazität speichert der A07-MON seine Messdaten zunächst auf die interne Speicherkarte und überträgt diese in definierten Zeitintervallen (z. B. stündlicher Upload der Rohdaten) zum Server. Prinzipiell ist ein Echtzeit-Streaming der Messdaten möglich. In der Monitoringsoftware werden die Daten automatisiert prozessiert und die Abweichungen zur Sollposition über ein Web-Interface dargestellt. Zur Erhöhung der Genauigkeit empfiehlt es sich, insbesondere bei langsamen Bewegungen die Messdaten in 12- oder 24-Stunden-Epochen zu prozessieren. In den Tageslösungen werden Höhen genauigkeiten von <5 mm erreicht. *Abb. 8* zeigt den Vergleich der Variation von 1-Stunden-Lösungen (blau) und 24-Stunden-Lösungen (grün) in der Höhenkomponente bei einer 200-m-Basislinie über den Zeitraum von 10 Tagen (Testmessung).

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die ersten Testmessungen mit dem A07-RTK-System an der Beuth-Hochschule haben eine brauchbare RTK-Leistungsfähigkeit des GNSS-Chips uBlox NEO M8P bestätigt. Unter Nutzung des – in Berlin kostenfreien – SAPOS-Dienstes wurden zentimetergenaue Koordinaten in Echtzeit bestimmt. Abweichungen von 1 cm–2 cm zu den bekannten Koordinaten entsprechen der Empfängerspezifikation und den bekannten RTK-Genauigkeiten professioneller Mehrfrequenz-Empfänger. Die Beobachtungsbedingungen am Festpunktfeld der Beuth-Hochschule sind in *Abb. 5* dargestellt.

Durch die Integration der RTK-Funktionalität werden Low-Cost-GNSS-Empfänger zukünftig vermehrt für Vermessungsaufgaben eingesetzt. Die Aufnahme und Absteckung von Punkten kann mit Systemen durchgeführt werden (z. B. A07-RTK), die kleiner, leichter und wesentlich günstiger als die heute eingesetzte Technik ist. Die Systeme sind ebenfalls für Anwendungen in der Bau-, Land- und Forstwirtschaft interessant. Die Vor-

aussetzung für den Einsatz von Low-Cost-Empfängermodulen ist die Verfügbarkeit von Gesamtsystemen, bestehend aus GNSS-RTK-Modul, GNSS-Antenne, Kommunikation, Stromversorgung und Applikationssoftware, welche für die Aufgabenstellungen optimiert sind. Durch die Verfügbarkeit des A07-Monitoringsystems und der AGIS-Software konnte die Alberding GmbH den Schritt zum A07-RTK rasch vollziehen, sodass sich einerseits neue Märkte für den A07 außerhalb des Monitorings erschließen, andererseits kann jetzt der A07-RTK auch für Monitoringanwendungen mit Echtzeitalarmierung eingesetzt werden.

Obwohl es sich bei dieser Testmessung um eine Stichprobe mit wenigen Punkten handelt und weitere Untersuchungen für allgemeingültige Aussagen erforderlich sind, konnte gezeigt werden, dass mit Low-Cost-L1-GNSS-Empfängern eine RTK-Positionierung möglich ist. Sicherlich haben geodätische Mehrfrequenz-Empfänger Vorteile bei der Geschwindigkeit und der Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösung und sind den Low-Cost-Modulen derzeit diesbezüglich überlegen.

Die Geodatenerfassung im Genauigkeitsbereich <1 m wird zukünftig ohne externes Zusatzgerät erfolgen. Google stellt in seinem aktuellen Android-Betriebssystem bereits L1-GNSS-Rohdaten zur Verfügung (Aussage der Fa. Google beim WhereCamp-Kongress an der Beuth-Hochschule im November 2016) und sucht nach innovativen Anwendungen. Mit der Marktmacht und Ent-

wicklungskapazität von Google ist davon auszugehen, dass heutige DGNSS-Anwendungen im Submeterbereich vom Smartphone übernommen werden. Firmen wie Apple und Samsung werden nachziehen. RTK-Genauigkeiten könnten zumindest mit externer Zusatzantenne möglich sein.

Inzwischen haben einige Low-Cost-GNSS-Empfängerhersteller (u. a. NVS, Broadcom) den Bau von kostengünstigen GNSS-Multifrequenzempfängern angekündigt. Zielgruppe dieser GNSS-Hersteller sind in erster Linie Anwendungen mit hohen Stückzahlen, wie das autonome Fahren. Die massenhafte Nutzung von RTK stellt neue Anforderungen an RTK-Korrekturdienste hinsichtlich der Art der Bereitstellung (eventuell Streaming mit neuen Datenformaten) und deren Verfügbarkeit. Die Kostenmodelle aktueller Dienste werden in Zukunft für diese Anforderungen nicht mehr greifen. Technologiefirmen, wie Google, Bosch, Vodafone, ggf. uBlox und andere, werden vermutlich eigene Dienste aufbauen. Sind SAPOS-Gebühren dann noch zeitgemäß?

Nachdem die Vermessungsanwender seit Mitte der 1980er-Jahre sehr viel Geld für GPS- und später GNSS-Technik bezahlt und damit Entwicklungen in anderen Markt Bereichen indirekt finanziert haben, bricht jetzt die Zeit an, bei dem die Vermessung von den Entwicklungen für Massenmärkte profitiert. In Zukunft werden verstärkt Nichtgeodäten die Technik anwenden. Dies wird sich u. a. auf Vermessungsbüros auswirken. Ein umfassendes Verständnis der gesamten Technologie ist trotzdem für einen idealen Einsatz erforderlich.

LITERATUR

Alberding, J. (2016): Geomonitoring mit Low-Cost-GNSS-Sensoren. In: Zeitschrift Wasserwirtschaft, 2016(09).

Mönikes, R.; Wendel, J.; Trommer, G. F. (2005): A Modified Lambda Method for Ambiguity Resolution in the Presence of Position Domain Constraints. In: Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 13.–16. September 2005, Long Beach, CA, USA.

Eling, C.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2014): Development of an RTK-GPS system for precise realtime positioning of lightweight UAVs. In: Wieser, A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich, 2014. Wichmann, Berlin/Offenbach, 111–124.

Stempfhuber, W. (2013): Leistungsfähigkeit von Low-Cost-RTK-GNSS-Systemen zur genauen Positionsbestimmung von UAV-Anwendungen. In: 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft/2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft. Bornimer Agrartechnische Berichte 81.

Stempfhuber, W.; Alberding, J. (2012): Geodätische Monitoringsysteme mit RTK-Low-Cost-GNSS. In: allgemeine vermessungsnachrichten (avn), 119 (2012)4, 132–139.

Stempfhuber, W.; Buchholz, M. (2011): A Precise, Low-Cost RTK GNSS System for UAV Applications. In: ISPRS Archives XXXVIII-1/C22, 289–293.

Takasu, T. (2009): RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS. In: FOSS4G, 2. November 2009, Tokyo, Japan.

uBlox (2016): Achieving Centimeter Level Performance with Low-Cost Antennas. UBX-16010559. White Paper. <http://www.u-blox.com> (11/2016).

Zhang, L. (2016): Qualitätssteigerung von Low-Cost-GPS-Zeitreihen für Monitoring Applikationen durch zeitlich-räumliche Korrelationsanalyse. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 776. München.

Prof. Dr.-Ing. Werner Stempfhuber

BEUTH-HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
FACHGEBIET PRAKTISCHE GEODÄSIE

Luxemburger Str. 10 | 13353 Berlin
stempfhuber@beuth-hochschule.de



Dipl.-Ing. Jürgen Alberding

ALBERDING GMBH

Schmiedestr. 2 | 15745 Wildau
ja@alberding.eu



Heidelberg

Beim **Vermessungsamt der Stadt Heidelberg** ist zum nächstmöglichen Zeitpunkt eine Stelle als

Vermessungsingenieurin/ Vermessungsingenieur

in der Abteilung Vermessung und Bodenordnung zu besetzen. Die Einstellung erfolgt unbefristet.

Das Aufgabengebiet umfasst sämtliche Tätigkeiten zur hoheitlichen Liegenschaftsvermessung im Stadtgebiet Heidelberg wie Grenzänderungen, Grenzfeststellungen und Gebäudeaufnahmen. Darüber hinaus ist die Bearbeitung ingenieurtechnischer Projekte, insbesondere die Aufnahme baulicher Veränderungen zur nachhaltigen Dokumentation im städtischen Geoinformationssystem und baubegleitende Vermessungsaufgaben bei städtischen Vorhaben der Aufgabenträgerin/dem Aufgabenträger zugeordnet.

Die Bezahlung erfolgt nach Entgeltgruppe 12 TVöD-V. Alternativ ist bei Vorliegen der beamtenrechtlichen Voraussetzungen auch eine Beschäftigung im Beamtenverhältnis mit einer Besoldung bis Besoldungsgruppe A12 LBesGBW möglich.

Die detaillierte Stellenausschreibung mit weiteren Informationen finden Sie unter www.heidelberg.de/stellenausschreibungen.

Haben wir Ihr Interesse geweckt?

Bitte bewerben Sie sich mit aussagekräftigen Unterlagen bis spätestens 30. April 2017 bei der

**Stadtverwaltung Heidelberg
Personal- und Organisationsamt
Postfach 10 55 20, 69045 Heidelberg**

oder per E-Mail an: bewerbung@heidelberg.de