

GNSS in der Hydrographie

Anja Heßelbarth

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten nutzen immer mehr Schiffe für die präzise Positionierung bei hydrographischen Vermessungsaufgaben die Globalen Navigation Satelliten Systeme (GNSS). Die dafür geforderten Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten sind z.B. durch die *International Hydrographic Organization* (IHO) definiert. Im Gegensatz zu den meisten Vermessungsaufgaben sind für hydrographische Anwendungen vor allem die vertikalen Genauigkeiten (*Total vertical uncertainty*, TVU 95% Vertrauensbereich) ausschlaggebend. Diese wiederum sind vom jeweiligen Messgebiet bzw. deren Tiefen abhängig. Für sicherheitskritische Messgebiete oder Anfahrten beträgt die geforderte vertikale Genauigkeit für 10 m Wassertiefen 0,26 m und für Wassertiefen bis zu 20 m 0,29 m. Die horizontale Genauigkeit (*Total horizontal uncertainty*, THU 95% Vertrauensbereich) beträgt hingegen 2 m. In Häfen oder im Binnenland werden teilweise Genauigkeiten von kleiner als 1 dm verlangt. Auch in Gewässern mit Tiefen von bis zu 200 m wird immer noch eine vertikale Genauigkeit von kleiner als 1 m gefordert (IHO 2008, Böder et. al. 2009).

Dieser Beitrag behandelt im Kapitel 2 verschiedene GNSS-Verfahren, deren Genauigkeiten sowie Limitierungen im Bereich der Hydrographie. Weiterhin werden für die jeweiligen Methoden Dienste bzw. Anbieter von Korrekturdaten präsentiert. Anschließend werden im Kapitel 3 spezielle Herausforderungen für hydrographische Anwendungen wie die Bereitstellung eines Kommunikationskanals und Einflüsse durch die Umgebung thematisiert. Einige Untersuchungen zu möglichen Genauigkeiten, Initialisierungszeiten usw. basierend auf aktuellen Messdaten folgen in Kapitel 4. Eine Zusammenfassung sowie aktuelle Entwicklungen und Trends in der präzisen Positionierung schließen diesen Beitrag ab.

2 GNSS Verfahren

Die Genauigkeit verschiedener GNSS-Auswerte- und Messmethoden ist davon abhängig wie gut verschiedene Fehlereinflüsse, welche die Beobachtungen beeinflussen, korrigiert bzw. modelliert werden können. Viele Effekte wie Satellitenbahn- und -uhrabweichungen sowie atmosphärische Effekte lassen sich durch Korrektur- bzw. Beobachtungsdaten einer Referenzstation bzw. eines Referenzstationsnetzes minimieren oder teilweise eliminieren. Andere

Effekte wie Mehrwege, Abschattungen oder Messrauschen, verursacht durch das Nah- und Fernfeld der GNSS-Antenne(n) müssen durch entsprechende Messanordnungen minimiert werden. Andere Fehlereinflüsse wie Phasenzentrumsvariationen bzw. Phasenzentrumsoffsets der Antenne lassen sich durch Kalibrierwerte reduzieren (Hofmann-Wellenhof et. al. 2008).

Neben den verschiedenen Möglichkeiten Korrekturdaten oder Modelle zu verwenden, ist die Genauigkeit auch davon abhängig, welche Art von Beobachtungsdaten als Hauptmessgröße verwendet werden. Die Trägerphasenbeobachtungen sind um den Faktor 100 genauer als Codebeobachtungen. Dies bedeutet für die Positionierung eine Genauigkeitssteigerung von mind. einer Größenordnung. Um mittels Phasenbeobachtungen eine cm-Genauigkeit erreichen zu können, ist es notwendig die Phasenmehrdeutigkeiten nach einer kurzen Initialisierungszeit festzusetzen (Hofmann-Wellenhof et. al. 2008).

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist für hydrographische Anwendungen besonders die vertikale Komponente entscheidend. Aufgrund der Satellitengeometrie sowie Fehlereinflüsse, die insbesondere die Höhe betreffen, ist die vertikale Komponente bei einer GNSS-Auswertung typischerweise um den Faktor zwei schlechter als die horizontale Komponente.

Die folgenden Unterkapitel fokussieren sich auf die phasenbasierenden Verfahren Real-Time Kinematic (RTK) sowie Precise Point Positioning (PPP) in Echtzeit. Codebasierte GNSS-Verfahren erreichen im Moment nicht die geforderten vertikalen Genauigkeiten. Die Nutzung des *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS) ist mit einer vertikalen Genauigkeit von 2-4 m (95% Vertrauensintervall) nur bedingt für hydrographische Anwendungen geeignet (EGNOS 2011).

2.1 Real-Time Kinematik

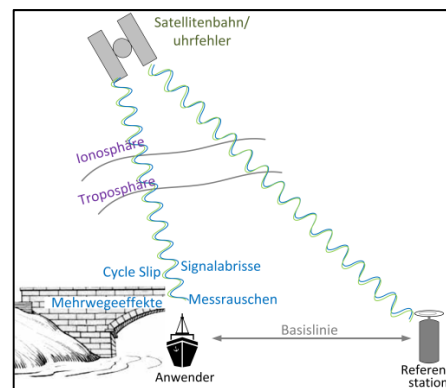


Abb. 1: Prinzip: Real Time Kinematic

RTK ist ein phasenbasierendes relatives GNSS-Auswerteverfahren welches in Echtzeit eine cm-genaue Positionsbestimmung ermöglicht (Abb. 1). Um diese Genauigkeit zu erreichen, sind präzise Korrekturdaten bzw. Beobachtungsdaten einer Referenzstation bzw. eines Referenzstationsnetzes notwendig. Weiterhin müssen für eine cm-genaue Positionierung die Trägerphasenmehrdeutigkeit in Echtzeit festgesetzt werden.

Diese Festsetzung kann allerdings durch Mehrwegeeffekte, Signalabrisse, Messrauschen oder atmosphärische Restfehler, insbesondere bei langen Basislinien zwischen Referenzstation und Rover, erschwert werden oder sogar fehlerhaft sein (Hofmann-Wellenhoff et. al. 2008).

Um eine fehlerhafte Festsetzung der Mehrdeutigkeiten und somit eine fehlerhafte Positionierung zu vermeiden, können mittels einer Integritätsprüfung die festgesetzten Phasenmehrdeutigkeiten auf Plausibilität untersucht werden. Dafür sind in einem ersten Schritt mittels einer oder mehrerer Monitorstation(en) geprüfte Korrekturdaten der Referenzstation zu verwenden. Weiterhin ist es notwendig das Korrekturdatenalter mit in das Bewertungsschema einfließen zu lassen. Im nächsten Schritt kann durch verschiedene interne statistische Parameter der RTK-Auswertung, Ausreißertests sowie Sensorredundanzen die Integritätsbewertung fortgesetzt werden. Vielversprechende Entwicklungen fanden dazu im Verbundprojekt „Leit- und Assistenzsysteme für die sichere Schifffahrt auf Binnenwasserstraßen (LAESSI)“ statt. Durch die Bewertung der Phasenmehrdeutigkeiten konnte in diesem Projekt erreicht werden, dass Positionen, die eine geforderte max. Abweichung von 10 cm überschreiten, nicht für weitere sicherheitskritische Anwendungen verwendet werden (Heßelbarth et. al. 2017).

Ein Nachteil für die Nutzung von RTK in der Hydrographie für Anwendungen auf hoher See ist die Limitierung der Basislinienlänge zwischen Rover und Referenzstation. Insbesondere ionosphärische und troposphärische Restfehler beeinflussen ab einer Reichweite von ca. 20-30 km die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten. Durch geeignete Modellierungen mittels Zwei-Frequenzbeobachtungen oder Schätzung des ionosphärischen und troposphärischen Restfehlers sowie deren Gradienten lässt sich die Basislinienlänge zwischen Rover- und Referenzstation deutlich erhöhen (Takusa und Yasuda 2010, Kuba et. al. 2012).

Des Weiteren wird mit zunehmender Basislinienlänge die Übertragung der Korrekturdaten erheblich erschwert bzw. ist mittels des üblichen globalen Systems für mobile Kommunikation (GSM) oder Internet nicht möglich. Kann keine ausreichende Kommunikation zur Verfügung gestellt werden, bleibt oftmals nur eine Postprocessing Auswertung übrig, was allerdings auch bedeutet dass alle Beobachtungsdaten gespeichert und anschließend ausgewertet werden müssen. Die dafür notwendigen Ressourcen stehen allerdings oftmals nicht zur Verfügung (Ellmer 2013).

2.1.1 SAPOS

Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) realisiert mit über 270 Stationen den amtlichen Raumbezug. Die Daten dieser Stationen werden hauptsächlich für das Generieren von Echtzeitkorrekturdaten in Form einer physischen oder virtuellen Referenzstation ge-

nutzt. Die Lagegenauigkeit des hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service (HEPS) wird mit 1-2 cm und die Höhengenaugigkeit mit 2-3 cm angegeben. Die Korrekturdaten beziehen sich auf den amtlichen Raumbezug, d.h. das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89). Standardmäßig werden Korrekturdaten für GPS und GLONASS angeboten (Jahn et. al. 2017).

Die Korrekturdaten entsprechen dem internationalen standardisierten Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)-Format, d.h. sie können von jedem üblichen Empfänger bzw. Software verarbeitet werden. Die Übertragung der Datenströme wird mittels Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip) Technik über Internet oder über GSM realisiert.

Die Nutzung dieser Korrekturdaten ist in den meisten Bundesländern noch kostenpflichtig (<https://www.sapos.de/dienste-im-ueberblick.html>). Berlin (<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/sapos/>) und Thüringen (<https://sapos.thueringen.de/>) bieten seit einiger Zeit die kostenfreie Nutzung dieses Services an. Bayern (https://sapos.bayern.de/lfps_register.php) stellt mittlerweile einen kostenfreien landwirtschaftlichen Fahrzeugpositionierungsdienst bereit. Wie sich diese Art der kostenfreien Bereitstellung von Korrekturdaten weiterentwickelt, werden die nächsten Jahre zeigen.

2.1.2 Private Anbieter

Ähnlich wie der SAPOS-Dienst generiert Trimble VRS Now Korrekturdaten basierend auf einem Netzwerk von permanenten Referenzstationen. Die ca. 175 Referenzstationen in Deutschland sowie den unmittelbaren Nachbarländern beziehen sich auf das ETRS89, den offiziellen Bezugsrahmen von Deutschland. Laut Trimble stehen im Gegensatz zu dem HEPS-Dienst von SAPOS Korrekturdaten für die GNSS GPS, GLONASS, Galileo, Beidou und *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) zur Verfügung und können in Teilen von Europa sowie den USA und Australien genutzt werden. Die horizontale Genauigkeit wird mit weniger als 2 cm (95% Vertrauensbereich) und die Initialisierungszeit mit weniger als 1 min angegeben (Trimble 2018). Die Korrekturdaten werden über Internet bzw. GSM in unterschiedlichen Datenformaten u.a. auch RTCM übertragen, sodass jeder geodätischer Empfänger zur RTK-Positionierung genutzt werden kann. (Wegener 2009).

HxGN SmartNet ist ein weltweit integrierter, zeitlich unabhängiger GNSS-Netzwerk RTK-Dienst basierend auf einem umfangreichen Referenzstationsnetz. Die Korrekturdaten werden im standardisierten RTCM-Format angeboten und können daher mit jedem Empfänger verarbeitet werden. Auch dieser Service verspricht die übliche RTK-Genauigkeit von wenigen cm (HxGN 2018).

2.2 Precise Point Positioning

PPP ist eine GNSS-Auswertetechnik, die mehr und mehr für die präzise Positionsbestimmung eingesetzt wird. Im Gegensatz zu RTK werden bei PPP keine lokalen Referenzstationen verwendet (Zumberge et. al. 1997, Heßelbarth 2011). Vielmehr werden Korrekturdaten genutzt, welche aus einem großräumigen regionalen bzw. globalen Netz von Referenzstationen bestimmt werden

(Abb. 2). Dies hat den Vorteil, dass die lokale bzw. regionale Begrenzung im Vergleich zu RTK aufgehoben wird. Der Nachteil von PPP ist allerdings, dass die hohen Genauigkeiten von wenigen cm stark von der Dauer der kontinuierlichen Phasenmessungen sowie den bereitgestellten Korrekturdaten abhängen. Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei PPP, vor allem in Echtzeit, ist deutlich schwieriger als bei RTK. Das derzeitige Konvergenzverhalten kann bis zu 30 min betragen (Heßelbarth 2011, Wanninger und Heßelbarth 2009, Kouba 2009, Hinterberger et. al. 2015).

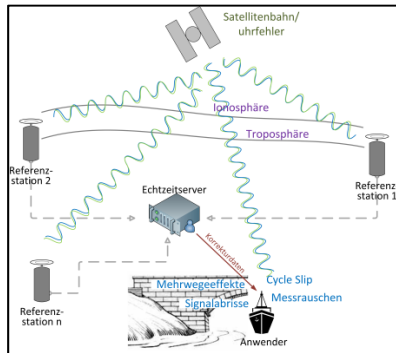


Abb. 2: Prinzip: Precise Point Positioning

Ein wesentliches Kriterium für die Mehrdeutigkeitsfestsetzung und somit das Erreichen der präzisen Positionierung bei Echtzeit-PPP sind die verfügbaren Korrekturdaten in Echtzeit. Neben Satellitenuhr- und -orbitkorrekturen sind vor allem Biases und atmosphärische Korrekturen erforderlich. Für die Bereitstellung dieser Informationen wurde ein RTCM-Format definiert, welches die sogenannten *State Space Representation* (SSR)-Nachrichten als offenen, herstellerunabhängigen Standard beschreiben.

Für diese SSR-Standardisierung war folgender Stufenplan vorgesehen (Tab. 1). Allerdings ist die Fertigstellung dieses Stufenplans derzeit stark verzögert, was zur Folge hat, dass im Moment nur die Stufe 1 seit 2011 abgeschlossen ist. Die Stufe 2 wird diskutiert und ist daher noch in der Entwicklung. Die Bearbeitung der Stufe 3 hat noch nicht begonnen (Söhne 2017, Jahn et. al. 2017). Dies hat zur Folge, dass mit den derzeitigen RTCM-Korrekturen nahezu keine Festsetzung von PPP-Mehrdeutigkeiten in Echtzeit möglich ist und somit die Konvergenzzeiten bis zu 30 min betragen können.

Tab. 1: Inhalt SSR-Stufenplan nach Jahn et. al. 2017

Stufe	Inhalt	Bemerkungen
1	Korrekturen für Satellitenbahnen,- uhren sowie Code-Bias der Satellitensignale	Standardisiert seit 2011 für GPS und GLONASS; dm-Genauigkeit nach langer Konvergenzzeit (ca. 30 min)
2	Phase-Biases der Satellitensignale und Vertical total electron content (VTEC) - Ionosphärenmodell	Phase-Bias ermöglicht PPP mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung VTEC-Ionosphärenmodell ermöglicht Einfrequenz-Anwendungen
3	Slant total electron content (STEC) -Ionosphärenkorrektur und „Gridded Troposphäre“	Genauigkeitsniveau ähnlich RTK, Konvergenzzeit < 1 Minute

2.2.1 Kostenfreie bzw. herstellerunabhängige Dienste

Der *International GNSS Service* (IGS) ist ein Zusammenschluss mehrere Organisationen, welcher seit mehr als 20 Jahren Beobachtungs- und Navigationsdaten als Dateien z.B. auf einem FTP-Server (<ftp://ftp.igs.org/pub/>) bereitgestellt (Kouba 2009). Seit April 2013 gibt es ein offizielles Projekt – den *IGS Real-Time Service* (IGS RTS) – welches sich mit der Aufarbeitung und dem Anbieten von Echtzeitprodukten beschäftigt (Agrotis et al. 2017, Söhne 2017).

Um die standardisierten SSR-Korrekturdaten nutzen zu können, muss sich der Anwender bei einem Anbieter wie z.B. dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) registrieren. Anschließend lassen sich die Beobachtungsdaten und Ephemeriden über einen Ntrip Client zur Positionsberechnung nutzen. Dafür können auch verschiedene Softwaretools wie der BKG Ntrip Client (BNC) oder RTKLIB genutzt werden (Agrotis et al 2017, Söhne 2017, Weber et. al. 2016, Takasu 2010).

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) hat beschlossen SSR-Interoperabilitätstests aktiv zu unterstützen. Dafür wurde zusammen mit Geo++ GmbH eine deutschlandweite RTCM-Testumgebung realisiert, basierend auf der SAPOS-Infrastruktur. Seit 2016 stehen verschiedene deutschlandweite RTCM-SSR-Datenströme zu Testzwecken zur Verfügung. Erste Untersuchungen und Tests zu einer SSR-basierenden Vernetzung im Bereich der Nordsee von seitens SAPOS in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) fanden in den Jahren 2014 und 2015 statt. Dabei wurden Höhengenaugkeiten von besser als 10 cm erreicht (Jahn et. al. 2017).

Andere vielversprechende Entwicklungen werden derzeit von Geo++ in Zusammenarbeit mit SAPOS bzgl. der Konvertierung von SSR zu RTK-

Korrekturnachrichten (*Observation State Representation*, OSR) durchgeführt. D.h. die üblichen PPP spezifischen Korrekturdaten können nach einer sogenannten SSR2OSR-Konvertierung mit einem RTK fähigen Empfänger verarbeitet werden (Wübbena et. al. 2017).

2.2.2 Kommerzielle Dienste

Fugro bietet einen hochgenauen PPP-Service an, welcher die GNSS Systeme GPS, GLONASS, Beidou (seit 2015) und Galileo (seit 2016) integriert und speziell für maritime Anwendungen geeignet ist. Das sogenannte G4-Netzwerk besteht aus weltweit verteilten 45 multi-GNSS-Stationen. Die Nutzung dieser vier Systeme hat den Vorteil, dass bei einer geringen Satellitenabdeckung oder größeren Abschattungen immer noch genügend Beobachtungen zur Verfügung stehen. Die Korrekturdaten werden über acht geostationäre Satelliten zur Verfügung gestellt, sodass ab einer geographischen Breite von kleiner als 75° mind. zwei geostationäre Satelliten sichtbar sind. Diese übertragen die Korrekturen via L-Band und können mit Standard-GNSS-Antennen empfangen werden. Um diesen Korrekturservice von Fugro nutzen zu können, muss ein entsprechender Empfänger, welcher die Informationen des L-Band Signal decodieren und verarbeiten kann, vorhanden sein (Tegedor et. al. 2017). Für statische Anwendungen werden die horizontale Genauigkeit mit ca. 1-2 cm (1-sigma) bzw. 5,9 cm (95% Vertrauensbereich) und die vertikale Genauigkeit mit 4-5 cm (1-sigma) bzw. 10,1 (95% Vertrauensbereich) angegeben. Die Konvergenzzeit beträgt ca. 20 min und entspricht somit der üblichen PPP-Konvergenzzeit. Genauigkeitsuntersuchungen basierend auf Basislinienauswertungen zweier Antennen auf dem Schiff, lassen ein ähnliches Genauigkeitsniveau für kinematische Anwendungen vermuten (Tegedor et. al 2017, Visser 2015).

Die Trimble CenterpointRTX Technologie verspricht eine cm-genaue Positionierung basierend auf den Daten eines weltweiten Referenzstationsnetzes von 100 Stationen. Die Korrekturdaten für GPS, GLONASS, Galileo, QZSS und Beidou werden über geostationäre Satelliten oder einen Internetdatenstrom angeboten. Die angegebene Genauigkeit beträgt < 4 cm (95% Vertrauensbereich) bei einer Konvergenzzeit von weniger als 30 min, in einigen Regionen sogar weniger als 5 min. Untersuchungen in Nordamerika über einen Zeitraum von mehreren Tagen zeigten eine horizontale Genauigkeit von 2,4 cm (95% Vertrauensbereich) und eine vertikale Genauigkeit von 4,4 cm (95% Vertrauensbereich) nach einer Konvergenzzeit von ca. 30 min (Leandro R. 2011, Weinbach 2016).

Ein weiterer globaler PPP-Dienst namens StarFire wird von John Deere, einen der größten Hersteller von Landmaschinen, betrieben. Basierend auf welt-

weit verteilten Stationen werden Echtzeitkorrekturen für GPS- und GLONASS Uhren und Orbits sowie Biases für die WideLane und Narrowline Linearkombinationen durch die sieben StarFire-Satelliten übertragen. Die horizontale Genauigkeit wird mit 3 cm (95% Vertrauensbereich) und die vertikale Genauigkeit mit 8 cm (95% Vertrauensbereich) angegeben. Die Initialisierungszeit beträgt weniger als 30 min kann aber durch einen zuverlässigen Quick Start reduziert werden (Söhne 2017, Dai et al. 2016).

3 Herausforderungen bei hydrographischen Anwendungen

Die im letzten Kapitel beschriebenen Genauigkeiten können nur erreicht werden, wenn gewisse Randbedingungen gegeben sind. Dies betrifft zum einen die Echtzeitübertragung der Korrekturnachrichten zum Schiff und zum anderen die Umgebungsbedingungen bzgl. der GNSS-Antenne.

3.1 Kommunikation

Die Korrekturdatenübertragung ist ein wesentlicher Bestandteil sowohl für das RTK-Verfahren als auch für Echtzeit-PPP-Anwendungen. Allerdings ist das Datenvolumen für die Übertragung von PPP-Korrekturen im Vergleich zu RTK deutlich geringer. In Abb. 3 ist der Unterschied des zu übertragenden Datenvolumens zwischen RTK und PPP dargestellt. Aufgrund dessen, dass nicht jede Korrektur zu jeder Epoche übertragen wird, ist das Datenvolumen deutlich reduziert. Für RTK-Daten, basierend auf mehreren Frequenzen und Satellitenkonstellationen, sind derzeit Bandbreiten von mehr als 9600 Bit pro Sekunde erforderlich.

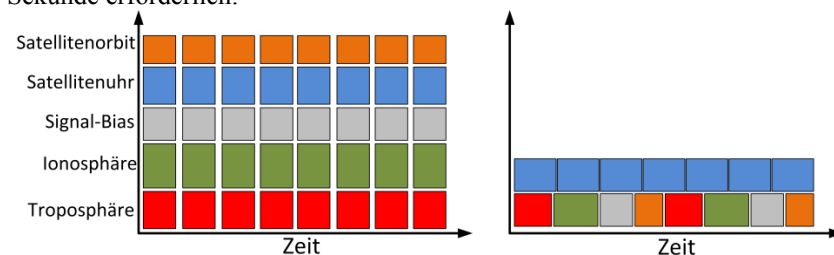


Abb. 3: Volumen der Korrekturdaten für RTK-OSR (rechts) und für PPP-SSR (links) (Wübbena et. al. 2017)

Eine gängige Kommunikationsmöglichkeit für RTK bzw. Netz-RTK ist die Nutzung von Mobilfunk im GSM-Standard bzw. die weitere Entwicklung des GPRS-Standards. Dies ermöglicht zum einen eine Übertragung von großen Datenmengen und zum anderen ist eine bi-direktionale Kommunikation zwischen Nutzer und Dienstleister möglich. Dies ist vor allem bei Netz-RTK für

die Standpunktbestimmung der virtuellen Referenzstation (VRS) notwendig. Zur Übertragung der Korrekturnachrichten wird das Ntrip-Protocol verwendet. Ein Nachteil von GSM/GPRS ist die teilweise fehlende Abdeckung in dünn besiedelten Gebieten sowie küstenfernen Regionen (Wanninger 2005).

Eine andere Möglichkeit für die Korrekturdatenübertragung vor allem im Binnenbereich ist die Nutzung der *Automatic Identification System* (AIS)-Infrastruktur der Wasser und Schifffahrtsverwaltung (WSV). AIS ist im maritimen sowie Binnenbereich standardisiert und dient der Kommunikation zwischen Schiffen, sowie zwischen Schiffen und Land und umgekehrt. Aktuell kann AIS auch für die Übertragung von Codekorrekturen sowie Wasserstraßeninformationen genutzt werden (Messagety 17). Dieser Dienst wird von der WSV angeboten und ist für jeden kostenfrei (Hoppe 2006, Hoppe 2017). Eine geplante Erweiterung des AIS-Konzeptes (*VHF Data Exchange System*, VDES), verspricht eine deutlich größere Bandbreite die für eine erweiterte Korrekturdatenübertragung (z. B. auch Phasendaten) genutzt werden kann (Bober 2015).

Erste Untersuchungen bzgl. einer Erweiterung von AIS für die Übertragung von RTK-Korrekturdaten fanden im Rahmen des Projektes LAESSI statt. Auch wenn die Datenkanäle stark ausgelastet waren und die erforderlichen Updateraten nicht immer erreicht wurden, war es dennoch möglich eine RTK-Positionsberechnungen durchzuführen (Hoppe 2018). Die nächsten Jahre werden diese Entwicklungen noch weiter vorantreiben, sodass dies eine echte Alternative zu GSM/GPRS vor allem im Binnenbereich aber auch mit seinen großen Reichweiten für die Küstenregionen sein kann.

Eine weitere Alternative Korrekturdaten zu übertragen, ist die Nutzung von geostationären Satelliten. Dies bietet sich vor allem für die hydrographische Vermessung küstenferner Gebiete an. Geostationäre Satelliten werden z.B. von *Satellite Based Augmentation Systems* (SBAS) genutzt. Die zu übertragenden Informationen werden auf ein L-Band aufmoduliert und können so von jedem Empfänger empfangen werden (EGNOS 2011).

Aber auch die beschriebenen Echtzeit-PPP-Dienste Fugro, Trimble Centerpoint RTX und StarFire nutzen zum Teil diese Art der Kommunikation für die Korrekturdatenübertragung (Tegedor et. al 2017, Leandro R. 2011). Dem Vorteil der Satellitenkommunikation einer stabilen Datenübertragung steht der Nachteil einer geringen Bandbreite gegenüber. Für die Übertragung von RTK-Korrekturen ist es daher eher nicht geeignet.

3.2 Effekte durch Umgebungsbedingungen

Umgebungsabhängige Effekte wie Mehrwege oder Abschattungen sind ein bedeutender Einflussfaktor bei der GNSS-Positionsbestimmung. Bei Mehrwegeeffekten kommt es zu Überlagerungen des Satellitensignals durch Reflektoren nahe der Antennenumgebung (Görres 2017, Rost 2011). Im Gegensatz

zu z.B. statischen Referenzstationen kommt es bei kinematischen Anwendungen neben den Änderungen der Satellitengeometrie auch zu Änderungen der Umgebungsbedingungen. Ebenso können Mehrwegeeffekte nicht durch lange Beobachtungszeiten herausgemittelt werden. Spezielle Antennen, wie z. B. ChokeRing-Antennen können ebenso nicht verwendet werden. Aufgrund dessen, sollte der Antennenstandpunkt sorgfältig ausgewählt werden. D.h. am höchsten Punkt des Schiffes mit möglichst wenigen Reflektoren wie z. B. Schiffsmasten, Kräne, Steuerhaus oder ähnliche Schiffsaufbauten. Ebenso empfiehlt es sich die Elevationsmaske auf mind. 10° zu setzen und eine entsprechende Gewichtung bei der GNSS-Prozessierung zu verwenden. Eine weitere, wenn auch aufwendige Möglichkeit ist die Modellierung der Mehrwegeeffekte durch z.B. Analysen der Signalqualität oder der Phasenresiduen (Rost 2011, Lachapelle 2003, Lehner 2005).

Gerade bei hydrographischen Anwendungen im Binnenland und Häfen kann es auch zu Abschattungen oder Mehrwege durch Objekte entlang des Wasserweges kommen. Auch diese lassen sich nur schwer vermeiden und können auch nicht, wie zum Beispiel die Mehrwegeeffekte auf dem Schiff, modelliert werden. Weiterhin kann es z.B. bei Brückendurchfahrten zu vollständigen Signalabbrissen kommen. Daher ist es wichtig z.B. bei RTK-Verfahren immer wieder eine schnelle neue Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten zu erreichen. Um ein fehlerhafte Mehrdeutigkeitsfestsetzung zu vermeiden, sollten auch wie schon in Kap. 2.1 beschrieben, immer vorab eine Plausibilitätsprüfung stattfinden. Weiterhin kann auch eine Inertiale Messeinheit (IMU) verwendet werden, um die Positionslösungen bei schwierigen Bedingungen, hervorgerufen durch Mehrwege oder Abschattungen, zu unterstützen oder Lücken in der Positionsberechnung, verursacht durch kurze Signalabrisse, zu überbrücken (Henkel und Sperl 2016).

4 RTK als Basis für hydrographische Anwendungen

Das DLR (Institut für Kommunikation und Navigation, Abteilung Nautische Systeme) hat sich in den letzten Jahren mit der Entwicklung von RTK-Algorithmen beschäftigt, welche neben Positions- und Navigationsinformationen auch Integritätsinformationen bereitstellen. Diese genauen und zuverlässigen Position- und Navigationsdaten können auch als Basis für hydrographische Anwendungen genutzt werden, wie der folgende Abschnitt zeigt.

4.1 Binnenland

Insbesondere für hydrographische Vermessungsarbeiten im Binnenbereich bietet sich derzeit die RTK-Positionsbestimmung an. Die Infrastruktur ist z. B.

durch ein umfangreiches Netz von Referenzstationen (z.B. SAPOS) gegeben und auch die GSM-Abdeckung ist meist verfügbar. Ein derzeitiger Vorteil von RTK gegenüber PPP ist die kurze Initialisierungszeit nach kompletten Signalabbrissen wie nach Brückendurchfahrten.

Im Rahmen des Projektes LAESSI wurden umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Initialisierungszeit durchgeführt. Für diese Analysen wurden für den Empfang der Rohdaten ein geodätischer GNSS-Empfänger (Javad Delta) sowie eine GNSS-Antenne (NavExperience) verwendet. Die RTK-Auswertung selbst wurde mit einer eigens entwickelten echtzeitfähigen Softwarelösung durchgeführt. Abb. 4 zeigt den horizontalen und vertikalen Positionsfehler dieser RTK-Auswertung, basierend auf den Daten einer Messfahrt im April 2017 auf der Mosel in Koblenz. Die Herausforderung bei dieser mehrstündigen Messkampagne waren die drei Brücken innerhalb von 300 m. Die Referenztrajektorie, auf die sich die nachfolgenden Ergebnisse beziehen, wurde mittels eines zielverfolgenden Tachymeters bestimmt.

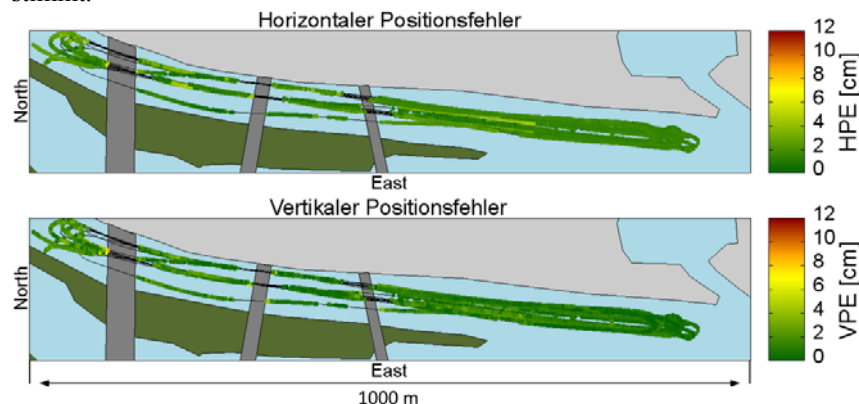


Abb. 4: Horizontaler und vertikaler Positionsfehler einer Messfahrt in Koblenz (Mosel), April 2017

Für die Darstellung des horizontalen und vertikalen Positionsfehlers wurden nur die auf Integrität geprüften RTK-Ergebnisse verwendet. Wie zu erkennen ist, konnten sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Position cm-genaue Ergebnisse erreicht werden, wobei die maximale Abweichung zur Referenz 7,3 cm bzw. 8,2 cm für die horizontale bzw. vertikale Komponente beträgt. Auch die stetige neue Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten nach Brückendurchfahrten beträgt durchschnittlich nur wenige Sekunden (< 10 Sekunden).

In Abb. 5 ist das Ost-Höhenprofil dieser Messfahrt für die DLR interne RTK-Lösung sowie für die RTK-Ergebnissen von kommerziellen Empfänger dargestellt. Als Vergleich dazu ist die Referenzlösung incl. einer Begrenzung

für die vorgegebene maximale Abweichung der vertikalen Komponente von ± 10 cm mit angegeben. Die Abbildung verdeutlicht nochmal, dass die Anforderung an die vertikale Genauigkeit erreicht ist und auch das Festsetzen der Mehrdeutigkeiten nach Brückendurchfahrten zügig erfolgt. Die DLR-RTK Auswertung ermöglicht darüber hinaus das Erkennen von Ausreißern im Vergleich zu kommerziellen Lösungen.

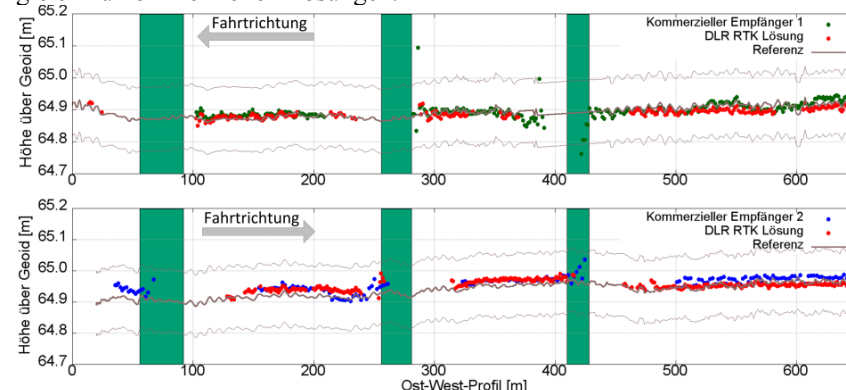


Abb. 5: Höhenprofile einer Messfahrt in Koblenz (Mosel), April 2017

Ebenfalls im Rahmen des Projektes LAESSI wurde die RTK Verfügbarkeit für weiträumigere Messfahrten untersucht. In Abb. 6 ist als Beispiel die Trajektorie basierend auf geprüften zuverlässigen RTK-Positionen in einem Zeitraum von mehreren Stunden und einem Fahrweg auf dem Main bzw. später Rhein von ca. 60 km dargestellt. Ein größerer GSM-Ausfall hat hier zu Folge, dass für ca. 2 km keine zuverlässige RTK-Positionierung verfügbar ist. Ist eine mobile Verbindung zur Datenübertragung vorhanden, beträgt die Verfügbarkeit von geprüften RTK-Positionsdaten 97,2 %.



Abb. 6: Lageprofil Messfahrt El Nino, Februar 2018

Das Höhenprofil in Abhängigkeit der Zeit ist in Abb. 7 dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass auch unter schwierigeren Bedingungen z.B. in Schleusenbereichen eine zuverlässige präzise RTK-Positionsbestimmung möglich ist.

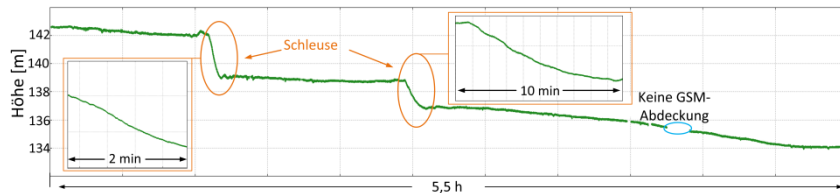


Abb. 7: Höhenprofil einer Messfahrt, Februar 2018

4.2 Maritime Anwendungen

Die RTK-Positionsbestimmung wird vor allem mit zunehmender Entfernung zur Referenzstation, welche sich üblicherweise an Land befindet, erschwert. In Abb. 8 ist als Beispiel die Trajektorie einer präzisen differentiellen Positionierung basierend auf den Daten einer Messfahrt zwischen Rostock und Trelleborg im März 2015 dargestellt. Auch hier sind nur die zuverlässigen Positionsdaten geplottet. Die Referenzstation befindet sich wie in der Abbildung erkennbar im Rostocker Hafen. Eine kontinuierliche Positionsbestimmung im Hafengebiet ist, wie im Bild rechts erkennbar, ohne Probleme durchführbar.

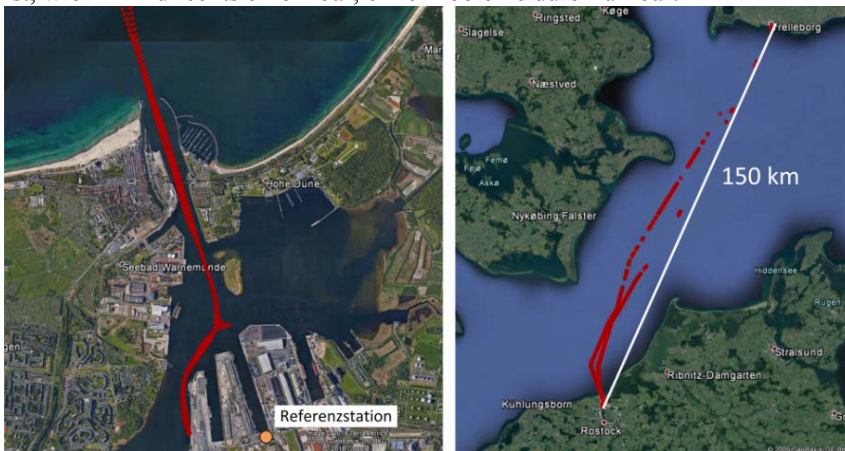


Abb. 8: Trajektorie der "Mecklenburg-Vorpommern" zwischen Rostock und Trelleborg, März 2015

Da die Kommunikation nicht über eine Distanz von 150 km basierend auf der GSM-Übertragung möglich ist, konnte nur mit aufgezeichneten und anschließend zusammengeführten Daten eine präzise differentielle Positionierung (linkes Bild) durchgeführt werden. Aufgrund dessen, dass die Auswertung nicht in Echtzeit erfolgte, wird der Begriff RTK an dieser Stelle vermieden, auch wenn der exakt identische Positionsalgorithmus verwendet wurde. Das

bedeutet im Detail, dass auch keine Filterung, Glättung oder ähnliche Vorverarbeitung bei dieser Auswertung stattgefunden hat.

Der Fokus dieser Auswertung ist daher mehr auf die Anzahl der zuverlässig gefixten Mehrdeutigkeiten. Tab. 2 zeigt die Anzahl der festgesetzten Mehrdeutigkeiten in Abhängigkeit der Basislinienlänge für vier Tage im Jahr 2015 an. Im Bereich von ca. 10 km, also für typische Anwendungen in Hafengebieten oder Küstennähe, bietet sich RTK mit einer Verfügbarkeit von ca. 99 % sowie einer vorhandenen Infrastruktur für die Kommunikation als geeignetes Positionierungsverfahren an. Mit zunehmender Entfernung (ab ca. 20 km) wird die Anzahl der festgesetzten Phasenmehrdeutigkeiten deutlich geringer.

Auch oder gerade wegen den Herausforderungen im Bereich der Kommunikation sollte PPP als alternatives Verfahren für küstenferne Gebiete fokussiert werden, denn gerade in diesen Messgebieten liegen meist kontinuierliche Phasenbeobachtungen über viele Stunden vor.

Tab. 2: Anzahl der festgesetzten Mehrdeutigkeiten [in %] in Abhängigkeit der Basislinienlänge, Jahr 2015

	Day of Year (DoY) 70	DoY 72	DoY 75	DoY 77
< 10 km	99,8 %	99,7 %	98,1 %	99,3 %
10 – 20 km	92,4 %	99,0 %	92,9 %	87,7 %
20 – 50 km	70,3 %	88,5 %	68,4 %	70,3 %
> 50 km	18,1 %	28,2 %	43,2 %	30,1 %

Genauigkeitsuntersuchungen für PPP im Bereich der Hydrographie wurden 2009 durchgeführt. Auch wenn die Auswertungen damals im Post-Processing erfolgten, zeigte sich, dass mit Genauigkeiten von wenigen cm die Anforderungen für hydrographische Vermessungsaufgaben erfüllt sind (Wanninger und Heßelbarth 2009).

5 Zusammenfassung und zukünftige Entwicklungen

RTK ist ein Standardpositionierungsverfahren, welches insbesondere durch die gegebene Infrastruktur im Binnenbereich eingesetzt werden kann. Allerdings muss im Speziellen für sicherheitskritische Anwendungen eine zuverlässige Positionsbestimmung sichergestellt werden. Dies bedeutet, dass neben der Bereitstellung der Positions- und Navigationsdaten auch eine interne Integritätsbewertung durchgeführt werden muss.

Allerdings gibt es vor allem bei sehr langen Basislinien Grenzen hinsichtlich der Phasenmehrdeutigkeitenfestsetzung und Kommunikation, sodass gerade für Anwendungen in küstenfernen Gebieten Echtzeit-PPP immer mehr an Bedeutung gewinnt oder gewinnen wird. Zahlreiche Dienste wie Fugro, Trimble

CenterpointRTX oder Starfire bieten Korrekturdaten an, welche dem Nutzer nach einer Konvergenzzeit von ca. 20-30 min eine dm-cm genaue Position ermöglicht. Im Gegensatz dazu ist die Standardisierung eines herstellerunabhängigen Formates nahezu zum Stillstand gekommen, wodurch die Entwicklung eines möglichen kostenfreien Dienstes gebremst wird. Es bleibt abzuwarten wie z.B. die Entwicklung des SAPOS SSR-Dienstes vorangeht.

Eine beachtliche Entwicklung von präzisen Positionierungsdiensten ist deutlich erkennbar. Erwähnenswert ist hier vor allem der relativ junge Zusammenschluss der Firmen Bosch, Geo++, Mitsubishi Electric und u-blox zu Sapcorda (www.sapcorda.com). Dieser Zusammenschluss hat sich als Ziel gesetzt einen hochpräzisen GNSS-Positionsservice für Massenmarktanwendungen anzubieten.

Interessant ist auch die Entwicklung des Centimeter Level Augmentation Service (CLAS, http://qzss.go.jp/en/overview/services/sv06_clas.html) in Japan zu verfolgen. Basierend auf dem Referenznetz deren QZSS verspricht dieser Service eine cm-genaue Positionierung. Der Startpunkt für die operationelle Phase war für den April 2018 angegeben.

Nicht zu vergessen ist der Markt der *Low-Cost* Empfänger, der in den nächsten Jahren noch stärker voranschreiten wird. Auch hier wird sich zeigen wie stark diese Entwicklung die Bereitstellung von möglicherweise kostenfreien Korrekturdaten fördert.

Literatur

- Agrotis, L.; Schönemann, E.; Enderle, W.; Caissy, M.; Rülke, A.: The IGS Real Time Service. In: DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe 87/2017.
- Bober, S. (2015): AIS next generation – the development of the VHD data exchange system (VDES) for maritime and inland navigation. In Smart Rivers. Buenos Aires, Argentina 2015.
- Böder, V. (2009): GNSS-Anwendungen in einem hydrographischen Multisensorsystem. In DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen. DVW Schriftenreihe Band 57/2009.
- Dai, L.; Chen, Y.; Lie, A.; Zeitzev, M.; Zhang, Y. (2016): StarFire SF3: Worldwide Centimeter-Accurate Real-Time GNSS Positioning. ION GNSS+ 2016. Portland.
- Ellmer, W. (2013): RTK in Referenznetzen auf See – Fokus Kommunikation. In DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter. DVW Schriftenreihe 70/2013.
- EGNOS (2011): User Guide for EGNOS, Application Developers. ED 2.0, 15/12/2011.
- Görres, B. (2017): Die GNSS-Empfangsantenne und ihre Wechselbeziehung mit der Stationsumgebung. In DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe 87/2017.

- Henkel, P.; Sperl, A. (2016): Precise RTK-Positioning with GPS/INS Tight Coupling and Multipath Estimation. Proc. Of ION/IEEE Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Savannah, GA, USA.
- Heßelbarth, A. (2011): Statische und kinematische GNSS-Auswertung mittels Precise Point Positioning (PPP), Dissertation. Deutsche Geodätische Kommission, C-667, München 2011, ISSN 0065-5325, ISBN 978-3-7696-5079-2.
- Heßelbarth, A.; Ziebold, R.; Sandler, M.; Alberding, J.; Uhlemann, M.; Hoppe, M.; Bröschel, M. (2017): Towards a reliable bridge collision warning system for inland vessel navigation based on RTK height determination. ION GNSS+ 2017, Portland.
- Hinterberger, F.; Weber, R.; Huber, K.; Lesjak, R. (2015): Ambiguity fixing in real-time PPP – Determination of uncalibrated phase delays using a regional network. In. Vermessung & Geoinformation 2+3/2015.
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E. (2009): GNSS Global Navigation Satellite Systems. Springer-Verlag Wien, New York.
- Hoppe, M. (2006): DGPS Dienst der WSV. Information zur Auswahl von GPS/DGPS Empfängern.
- Hoppe, M.: GNSS-Anwendungen in der Schifffahrt. In: DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe 87/2017.
- Hoppe, M.; Sandler, M.; Heßelbarth, A.; Ziebold, R.; Alberding, J.; Uhlemann, M.; Bröschel, M.; Burmisova, L. (2018): Driving Assitance Systems for Inland Vessels based on High Precision DGNSS. IALA-Konferenz 2018, Südkorea.
- HxGN SmartNet (2018): <https://hxgnsmartnet.com/de-de/>. Zugriff April 2018.
- IHO Standards for Hydrographic Surveys (2008): Special Publication. No. 44. Published by the International Hydrographic Bureau Monaco.
- Jahn, C-H.; Riecken, J.; Trautvetter C.; Freitag, M; Kurtenbach, E.; Fabian, G.; Dick, H-G: Quo vadis SAPOS[®]? – Zukünftige Entwicklungen des Positionierungsdienstes der Landesvermessung. In DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe 87/2017.
- Kouba, J. (2009): A guide to using International GNSS Service (IGS) products. <http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf>.
- Kubo, Y.; Tanaka, H.; Ohasi, M.; Sugimoto, S. (2012): Long Baseline GNSS Relative Positioning with estimation ionospheric and tropospheric delays and theirs gradients. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Voume 8, Number 3(B), March 2012.
- Leandro, R., Landau, H. (2011). Proceedings of the 24th International Technical meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, September, 2011.
- Lachapelle, G.; Julien, O.; MacGougan, G.; Cannon, E. (2003): Ship Multipath Detection Experiments. Annual Meeting, The Institut of Navigation, Albuquerque, June 2325.
- Lehner, A.; Steingass, A. (2015): A Novel Channel Model for Land Mobile Satellite Navigation. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, 13 -16 September 2005, Long Beach, CA.
- Rost, C. (2011): Phasenmehrwegereduzierung basierend auf Signalqualitätsmessungen geodätischer GNSS-Empfänger. Dissertation. Deutsche Geodätische Kommission. C-665, München 2011, ISBN 978-3-7696-5079-2.
- Söhne, W (2017). Zum Status von Precise Point Positioning (PPP). In: DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe 87/2017.

- Takasu, T. (2012): Real-time PPP with RTKLib and IGS real-time satellite orbit and clock. IGS-Workshop, Newcastle, Großbritannien.
- Takasu, T. Yasuda, A. (2010): Kalman-Filter-Based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-Baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation. ION NTM, 2010.
- Tegeedor, J.; Ørpen, O.; Melgård, T.; Łapucha, D.; Visser, H. (2017): G4 Multi-consellation Precise Point Positioning Service for High Accuracy Offshore Navigation. TransNav. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Volume 11. Number 2, September 2017.
- Trimble VRSNow 2018. <http://www.trimble.com/positioning-services/vrs-now>. Zugriff, April, 2018.
- Visser, H.; Buttress, R (2015): Marinestar GNSS Augmentation Services. Fugro Satellite Positioning. Hydrographic Society South West Plymouth 2015.
- Wanninger, L.; Heßelbarth, A.: GNSS Precise Point Positioning und seine Anwendung in der Hydrographie (2009). In: DVW e.V. (Hrsg.) Hydrographie – Neue Methoden von der Erfassung zum Produkt. DVW-Schriftenreihe, Band 58/2016.
- Weber, G.; Mervat, L.; Stürze, A.; Rülke, A.; Stöcker, D. (2016): BKG Ntrip Client (BNC) Version 2.12. Mitteilungen des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Band 49., ISBN 978-3-86482-083-0.
- Wegener, V. (2009): Trimble VRS Now – RTK einfach nutzen. In DVW e.V. (Hrsg). GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen. DVW Schriftenreihe Band 57/2009.
- Weinach, U; Brandl, M; Chen, X; Drescher, R; Glocker, M; Landau, H; Pastor, F.; Reussner, N.; Thomas, K. (2016). Triple Frequency PPP with Trimble Center-PointRTX. ION GNSS+ 2016. Portland.
- Wübbena, G.; Wübbena, J.; Wübbena, T.; Schmitz, M. (2017) SSR Technologie for Scalable Real-Time GNSS Application. IGS Workshop 2017. Paris Diderot University.
- Zumberge, J.; Heflin, M.; Jefferson, D.; Watkins, M; Webb, F. (1997): Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research 102.

Kontakt

Dr.-Ing. Anja Heßelbarth
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation, Abteilung Nautische Systeme
 Kalkhorstweg 53
 17235 Neustrelitz
anja.hesselbarth@dlr.de