

Galileo, Compass und QZSS: Aktueller Stand der neuen Satellitennavigationssysteme

Peter Steigenberger, Andre Hauschild, Oliver Montenbruck und Urs Hugentobler

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden momentaner Ausbaustand sowie zukünftige Entwicklungen der neuen Satellitennavigationssysteme Galileo, Compass und QZSS sowie der hierfür notwendigen Empfänger und Antennen vorgestellt. Daten eines globalen Netzes von Multi-GNSS-Empfängern erlauben die Bestimmung von Satellitenbahn- und Uhrenparametern. Aufgrund der begrenzten Satellitenzahl dieser Systeme ist derzeit nur eine kombinierte Auswertung gemeinsam mit GPS-Beobachtungen möglich. Die Genauigkeit der so bestimmten Satellitenbahnen liegt im Dezimeterbereich. Da Compass in seinem Ausbau am weitesten fortgeschritten ist, lässt sich bereits heute eine präzise Einzelpunktbestimmung ausschließlich mit Compass-Beobachtungen durchführen. Die hierbei erzielten Genauigkeiten liegen im Bereich etlicher Zentimeter verglichen mit entsprechenden GPS-Resultaten.

Summary

The current status and future developments of the new satellite navigation systems Galileo, Compass, and QZSS are presented and requirements for receivers and antennas are discussed. Global multi-GNSS tracking data allows for orbit and clock determination of these systems. A combined analysis with GPS is currently mandatory due to the limited number of satellites. The estimated satellite orbits have a decimeter accuracy level. The current deployment status of Compass allows for precise point positioning with Compass observations only. These Compass-only results agree with the GPS-only results in the order of several centimeters.

Schlüsselwörter: GNSS, Bahnbestimmung, Uhrenbestimmung

1 Einführung

Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) haben sich in den letzten 30 Jahren von einer teuren Technik für Spezialisten zur Massenmarktauglichkeit hin entwickelt. Die voll operationellen Systeme GPS (das amerikanische Global Positioning System) und das russische Pendant GLONASS werden derzeit modernisiert, und neue Satellitengenerationen senden zusätzliche Signale in erweiterten Frequenzbereichen (Bonnor 2012). Europa und China arbeiten am Aufbau von Galileo bzw. Compass und Japan am Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), einem regiona-

len Ergänzungssystem für GPS. Bis zum Ende der Dekade sollen dem Nutzer über 100 Navigationsatelliten zur Verfügung stehen.

Um die Möglichkeiten der modernisierten bzw. neuen GNSS zu nutzen, ist neben der erforderlichen Hardware (Empfänger und Antennen) auch eine Integration der neuen Systeme in bestehende Auswertesoftware sowie die Entwicklung neuer Algorithmen erforderlich. Im Folgenden sollen der aktuelle Stand der im Aufbau befindlichen Satellitennavigationssysteme beschrieben und die weitere Entwicklung aufgezeigt werden. Ausgewählte Ergebnisse der Bahn- und Uhrenbestimmung sowie ein Positionierungsexperiment ausschließlich mit Compass-Beobachtungen zeigen den bereits erreichten Stand der neuen GNSS.

1.1 Galileo

Das europäische Satellitennavigationssystem Galileo wird derzeit von der Europäischen Union auf politischer Ebene und der europäischen Raumfahrtagentur ESA auf technischer Ebene aufgebaut. Die beiden Galileo-Testsatelliten GIOVE-A und -B wurden im Dezember 2005 bzw. im April 2008 gestartet (Benedicto et al. 2006, Malik et al. 2009). Die GIOVE-Missionen wurden von der ESA am 30. Juni 2012 (GIOVE-A) bzw. am 23. Juli 2012 (GIOVE-B) für beendet erklärt. Ergebnisse zur GIOVE Bahn- und Uhrenbestimmung sind in ESA (2012), García et al. (2008), Hahn et al. (2007), Kirchner et al. (2009), Schönemann et al. (2007) und Steigenberger et al. (2011) zu finden.

Der Start der ersten beiden von Astrium gefertigten In-Orbit Validation (IOV) Satelliten erfolgte im Herbst 2011 (GPS World 2011). Die Nutzlast dieser Satelliten ist identisch mit derjenigen der operationellen Galileo-Satelliten, lediglich der Satellitenbus unterscheidet sich. Zwei weitere IOV-Satelliten sollen noch folgen, bevor dann ab 2013 die operationellen Galileo-Satelliten den Aufbau der Satellitenkonstellation vorantreiben sollen. Ein erster Auftrag über 14 Satelliten erging im Jahr 2010 an die OHB System AG (Bremen), Anfang 2012 folgte ein zweiter Auftrag über acht weitere Satelliten an dieselbe Firma. Somit sind 26 von nominell 30 Satelliten in Auftrag gegeben. Die Vergabe der restlichen vier Satelliten ist momentan noch offen. Die vollständige Satellitenkonstellation sowie alle geplanten Dienste sollen ab 2020 zur Verfügung stehen.

1.2 Compass

Seit Anfang 2009 arbeitet China intensiv am Aufbau eines zunächst regionalen Satellitennavigationssystems, das später in ein System mit globaler Abdeckung umgewandelt werden soll. Neben den klassischen GNSS-Bahnen im mittleren Erdorbit (Medium Earth Orbit, MEO, bei Compass eine Bahnhöhe von etwa 27.900 km) weist das

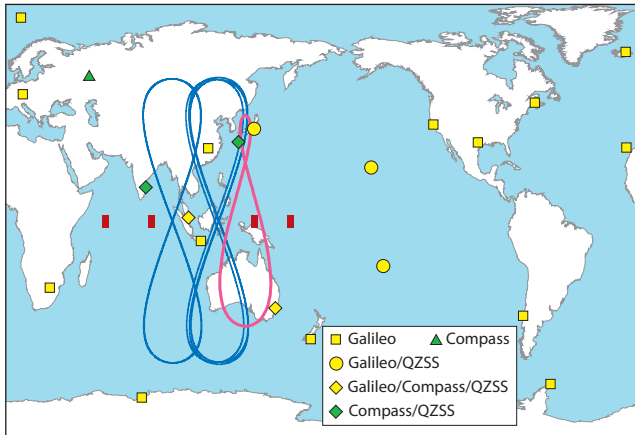


Abb. 1: Bodenspuren von QZS-1 (magenta), Compass GEO- (rot) und Compass IGSO-Satelliten (blau) sowie die für die jeweilige Bahn- und Uhrenbestimmung verwendete GNSS-Stationen

Compass-System auch spezielle Bahnen mit regionaler Überdeckung auf:

- Satelliten in geneigtem geosynchronem Orbit (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) mit einer Bahnneigung von etwa 55°, kleiner Exzentrizität ($e < 0.003$) und einer Bahnhöhe von 35.787 km. Dieser Orbit zeichnet auf der Erdoberfläche eine Spur in Form einer Acht (s. Abb. 1).
- Geostationärer Orbit (Geostationary Earth Orbit, GEO) mit einer Bahnhöhe von ebenfalls 35.787 km. Da die Bahnneigung nicht exakt null ist, weist die Bodenspur eine gewisse Nord-Süd-Bewegung auf (s. Abb. 1).

Im Allgemeinen ist über Compass wenig Offizielles bekannt. Es existiert lediglich ein Entwurf des Interface Control Documents, der aber nur einen Teil der Signale auf der ersten Frequenz beschreibt (China Satellite Navigation Office 2011). Ende 2011 wurde ein erster regional beschränkter Dienst für vorläufig operationell erklärt. Diese Phase 1 soll bis Ende 2012 voll operationell sein, Phase 2 mit der Erweiterung auf einen globalen Dienst

Tab. 1: Momentane Compass Satellitenkonfiguration sowie Satellitenzahl in den Ausbaustufen 1 und 2

	MEO	IGSO	GEO
September 2012	5	5	4
Phase 1	4	5	5
Phase 2	27	3	5

soll bis 2020 erfüllt sein (Shi et al. 2012). Die Zusammensetzung der Satellitenkonstellation der verschiedenen Bahnkategorien ist in Tab. 1 aufgeführt. Der aktuelle Status der Compass-Konstellation sowie technische Details sind in Jun et al. (2012) dargestellt. Gong et al. (2012), Montenbruck et al. (2012) und Shi et al. (2012) diskutieren erste Ergebnisse zur Compass Signal- und Uhrenanalyse sowie zur absoluten und relativen Positionierung mit ausschließlich Compass.

1.3 QZSS

Das japanische Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) ist im Gegensatz zu Galileo und Compass kein eigenständiges System, sondern eine Ergänzung zu GPS. Es soll insbesondere in den Straßenschluchten japanischer Großstädte die GNSS-Verfügbarkeit erhöhen, indem immer einer der ursprünglich drei geplanten QZSS-Satelliten in der Nähe des Zenits über Japan sichtbar ist (Inaba et al. 2009). QZSS-Satelliten befinden sich in einem exzentrischen IGSO-Orbit, der sich in Form einer asymmetrischen Acht auf der Erdoberfläche abbildet (s. Abb. 1). Durch diese Asymmetrie wird die Verweildauer der Satelliten in der Nähe des Zenits über Japan im Vergleich zu den annähernd kreisförmigen IGSO-Bahnen von Compass deutlich erhöht. Inzwischen gibt es sogar Pläne für eine Erweiterung von QZSS auf insgesamt sieben Satelliten (Langley 2011). QZSS-Satelliten senden auf den drei GPS-Frequenzen L1, L2 und L5 sowie im Galileo L6-Band ein L-Band EXperimental (LEX) Signal. Derzeit ist ein IGSO-Satellit (QZS-1) im Orbit, der im September 2010 gestartet wurde. Erste Ergebnisse zur QZSS Signal-, Orbit- und Uhrenanalyse sind in Hauschild et al. (2012), Kishimoto et al. (2011, 2012), Sakai et al. (2012), Sawamura et al. (2012) und Steigenberger et al. (2012) zu finden.

2 Beobachtungen der neuen GNSS

Heutige praktische Anwendungen von GNSS beschränken sich zumeist auf die L1- und L2-Beobachtungen von GPS und ggf. GLONASS. Einzelne Satelliten dieser beiden GNSS senden aber bereits auf zusätzlichen Frequenzen: L5 bei GPS und L3 bei GLONASS. Mit Galileo, Compass und QZSS kommen weitere Frequenzbänder hinzu (s. Abb. 2). Bestimmte Frequenzen werden von mehreren GNSS genutzt, beispielsweise senden im L5-Band GPS, Galileo (E5a) und QZSS auf derselben Frequenz. Dies ermöglicht den einfacheren und preiswerteren Bau von Multi-GNSS-Empfängern.

Diese neuen Satellitensignale stellen allerdings auch zusätzliche Anforderungen an Empfänger und Antennen. Neben dem erweiterten Frequenzbereich benötigen die Empfänger eine ausreichende Kanalzahl, um alle Signale der an einem Ort sichtbaren Satelliten empfangen

zu können. Hierfür sind bei vollem Ausbau der vier Systeme GPS, GLONASS, Galileo und Compass etwa 200 bis 250 Kanäle erforderlich. Diese Anforderung wird aktuell nicht von allen erhältlichen Multi-GNSS-Empfängern erfüllt, sodass hinsichtlich der Anzahl der getrackten Satelliten oder Signale Kompromisse eingegangen werden müssen. Während viele der aktuellen geodätischen GNSS-Empfänger hardwareseitig (Frontend) bereits für einen Großteil der neuen Signale ausgelegt sind, herrscht auf der Software-Seite (Firmware) teilweise noch Entwicklungsbedarf, um entsprechende Funktionalität zu implementieren bzw. zu verbessern.

Ebenso wie die Empfänger müssen auch die GNSS-Antennen für die erweiterten Frequenzbereiche der neuen Signale geeignet sein. Hier sind Modifikationen der klassischen Dorne/Margolin-Antenne, angepasste Groundplane-Antennen, aber auch vollständige Neuentwicklungen auf dem Markt (Montenbruck et al. 2010). Neben der Eignung der Antennen für die neuen Frequenzen sind auch Phasenzentrumskalibrationen für die neuen Signale erforderlich, da die entsprechenden Korrekturen frequenzabhängig sind. Feldkalibrierungen mit einem Roboter (heutiger Standard für GPS und GLONASS L1/L2, Menge 2003) sind für die neuen Frequenzen kaum möglich, da nur sehr wenige Satelliten diese Signale bereits aussenden. Gegenwärtig ist die Bestimmung von entsprechenden Antennenkalibrierwerten nur mit Messungen in anechoischen Kammern (Zeimetz 2010) möglich, da dort beliebige Frequenzen kalibriert werden können.

Essentiell für die Verwertbarkeit der GNSS-Beobachtungen ist ein allgemein anerkanntes Datenaustauschformat, das die Beobachtungen exakt und eindeutig wiedergibt. Bereits in der Vergangenheit hat sich das Receiver Independent Exchange Format (RINEX) als internationaler Standard durchgesetzt. Allerdings ist die nach wie vor weit verbreitete RINEX Version 2 nicht in der Lage, die Vielzahl der neuen GNSS-Signale und die verschiedenen technischen Verfahren, diese Signale zu empfangen, eindeutig abzubilden. Dies ist erst mit der RINEX Version 3 (Gurtner und Estey 2009) möglich, bei der u. a. die Abkürzungen der GNSS-Signale von zwei auf drei Stellen erweitert wurden. Somit ist die Darstellung aller Galileo- und Compass-Signale möglich, aber auch für GPS und GLONASS kann eine genauere Spezifizierung der jeweiligen Signale vorgenommen werden.

Um frühzeitig Erfahrungen mit den Beobachtungen der neuen GNSS sammeln zu können, wurde im Jahr 2009 vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Oberpfaffenhofen) und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, Frankfurt am Main) mit dem Aufbau des Cooperative Network for GIOVE Observation (CONGO) begonnen. Inzwischen tragen weitere Einrichtungen, wie das Deutsche GeoForschungsZentrum (GFZ, Potsdam), zum CONGO-Netzwerk bei. Eine Charakterisie-

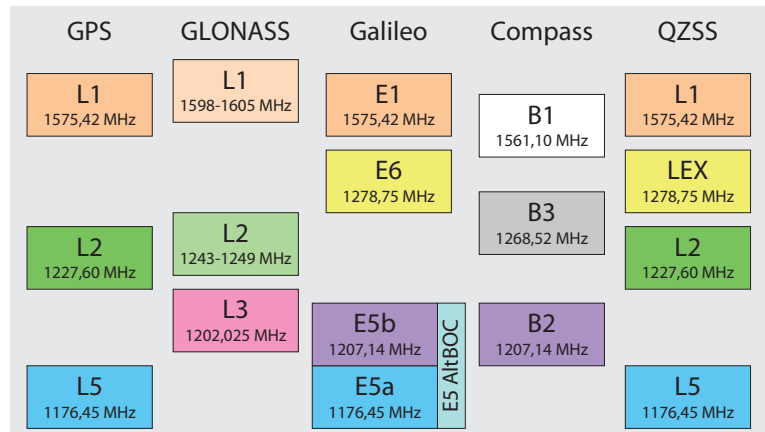


Abb. 2: Frequenzbereiche der Satellitennavigationsysteme GPS, GLONASS, Galileo, Compass und QZSS. Identische Farben markieren die Interoperabilität der entsprechenden Signale

rung der im CONGO-Netzwerk verwendeten Antennen und Empfänger liefern Montenbruck et al. (2010). Die unten beschriebenen Ergebnisse der Galileo, Compass und QZSS Bahn- und Uhrenbestimmung basieren zu einem Großteil auf Beobachtungsdaten dieses Netzes.

Der International GNSS Service (IGS, Dow et al. 2009) hat Anfang 2012 das Multi-GNSS EXperiment (MGEX, Weber 2012) ins Leben gerufen. Im Rahmen dieses Projektes sollen die einzelnen Komponenten des IGS (Stationsnetz, Datenzentren und Analysezentren) Beobachtungen verschiedener GNSS aufzeichnen, dem Nutzer zur Verfügung stellen und Produkte wie Bahn- und Uhrenparameter erzeugen. Das Beobachtungsnetz ist gegenwärtig aber äußerst inhomogen mit einem Schwerpunkt der Stationsverteilung in Europa und großen Lücken im Rest der Welt. Einzelne MGEX-Stationen wurden aber hier zur Verdichtung des CONGO-Netzes verwendet.

3 Bahn- und Uhrenbestimmung

Exemplarisch werden im Folgenden Ergebnisse der Bahn- und Uhrenbestimmung der ersten beiden Galileo IOV-Satelliten, der Compass GEO- und IGSO-Satelliten sowie von QZS-1 vorgestellt. Die Ergebnisse für Galileo und Compass beziehen sich auf den Zeitraum 28. März bis 1. April 2012, für QZSS auf den Zeitraum 22. bis 26. Mai 2012.

3.1 Auswertestrategie

Aufgrund der momentan noch eingeschränkten Satellitenanzahl ist eine alleinige Auswertung von Galileo- und Compass-Beobachtungen schwierig bis unmöglich. QZSS wurde ohnehin nicht als eigenständiges System entwickelt, sondern als Ergänzung zu GPS. Daher kommt im Folgenden eine kombinierte Auswertung jeweils eines Systems mit GPS-Beobachtungen mit einer modifizierten Version der Bernese GPS Software 5.0 (Dach et al. 2007)

zur Anwendung. Die hierfür verwendeten CONGO- und MGEX-Stationen sind in Abb. 1 dargestellt.

In einem ersten Schritt werden Koordinaten, Troposphären- und Empfängeruhrparameter anhand von GPS-Beobachtungen geschätzt. Hierfür werden undifferenzierte GPS Code- und Phasenbeobachtungen für ein Precise Point Positioning (PPP) verwendet. Die GPS Orbit- und Uhrenparameter des Center for Orbit Determination in Europe (CODE, Dach et al. 2009) werden dabei als bekannt eingeführt. Die aus GPS bestimmten Parameter werden im zweiten Schritt, der nur Galileo/Compass/QZSS-Beobachtungen verwendet, als bekannt eingeführt. Verbleibende Unbekannte sind somit epochenspezifische Satellitenuhrparameter, Ambiguities und Bahnparameter von Galileo/Compass/QZSS. Die Bahnparameter bestehen aus den sechs Keplerelementen und ein bis fünf Strahlungsdruckparametern (Beutler et al. 1994).

Neben diesen Parametern müssen jedoch auch Biases zwischen GPS und Galileo/Compass/QZSS, aber auch zwischen den verschiedenen Empfängern berücksichtigt werden. Dies geschieht durch die Schätzung von stationsspezifischen differentiellen Code Biases (DCBs), die einerseits die Unterschiede zwischen GPS und Galileo/Compass/QZSS berücksichtigen (Intersystem-Bias) als auch die Unterschiede der beteiligten Empfänger und der von diesen aufgezeichneten Signale (Interfrequency-Bias, z. B. zwischen GPS L2 und Galileo E5a). Diese Biases können jedoch nicht absolut bestimmt werden, sondern nur differentiell. Daher wird im konkreten Fall der Bias eines Referenzempfängers auf Null fixiert.

Die Daten werden zunächst in täglichen Intervallen verarbeitet. Um die Stabilität der Bahnparameter zu erhöhen, werden die Beobachtungen aufeinander folgender Tage anschließend zu Mehrtageslösungen kombiniert und in einem weiteren Schritt dazu konsistente Uhrenparameter bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung der Prozessierungsstrategie ist in Steigenberger et al. (2011) zu finden.

3.2 Bahnparameter

Zur Beurteilung der internen Konsistenz der geschätzten Satellitenbahnen sind in Tab. 2 zwei verschiedene Größen aufgeführt: zur Berechnung des *Orbit-Fit RMS* wird durch Bahnbögen zweier aufeinander folgender Tage ein 2-Tagesbogen gefittet. Der RMS der ursprünglichen Bahnen bezüglich des neuen Bahn Bogens dient als Indikator für die interne Konsistenz. Eine einfachere Methode zur Bahnvalidierung sind die *Sprünge an Tagesgrenzen*. Hierfür wird die 3D-Differenz der Orbitpositionen um Mitternacht berechnet. Für die Berechnung der Werte in Tab. 2 wurde jeweils der mittlere Tag einer 5-Tageslösung verwendet.

Die Konsistenz liegt im Allgemeinen im Bereich etlicher Zentimeter bis Dezimeter. Die Orbit-Fit RMS-Werte sind generell kleiner als die Tagesgrenzensprünge. Auf-

Tab. 2: Konsistenztests der Galileo, Compass und QZSS Satellitenbahnen. Die Werte für Compass sind Mittelwerte über die vier GEO- bzw. fünf IGSO-Satelliten

Satellit	Orbit-Fit RMS [cm]	Tagesgrenzensprünge [cm]
IOV-1	1,6	8,7
IOV-2	2,7	12,3
Compass GEO	14,6	47,3
Compass IGSO	1,9	15,3
QZS-1	3,3	25,1

fällig sind die wesentlich schlechter bestimmten Bahnen der Compass-GEO-Satelliten. Dies liegt in erster Linie an den geringen zeitlichen Änderungen in der Beobachtungsgeometrie, da die Satelliten sich von der Erde aus gesehen immer annähernd an derselben Position über dem Äquator befinden. Die Konsistenz der Compass-IGSO-Satelliten liegt im Dezimeter-Bereich und ist etwas besser als diejenige von QZS-1. Die Orbit-Fit RMS-Werte liegen für die GEO-Satelliten bei etwa 15 cm, für die anderen Satelliten im Bereich weniger Zentimeter. Im Gegensatz zu den Tagesgrenzensprüngen stellen diese Werte eine mittlere Abweichung über einen Zeitraum von zwei Tagen dar und sind daher erwartungsgemäß kleiner. Eine mögliche Erklärung der schlechteren Bahnkonsistenz von IOV-1 (verglichen mit IOV-2) ist die Tatsache, dass IOV-2 von den Stationen in Davis (Antarktis) und Myva (Island) aufgrund der dort eingesetzten Empfänger nicht getrackt wurde. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bahnkonsistenz für die MEO- und IGSO-Satelliten bei etwa einem Dezimeter, für die GEO-Satelliten bei etlichen Dezimetern liegt.

Bisher wurde nur die interne Konsistenz der Satellitenbahnen betrachtet. Aufgrund systematischer Fehler kann die absolute Genauigkeit jedoch schlechter sein. Eine unabhängige Validierung der aus GNSS-Mikrowellenbeobachtungen bestimmten Satellitenbahnen ist mit Hilfe des optischen Verfahrens Satellite Laser Ranging (SLR) möglich. Die SLR-Stationen des International Laser Ranging Service (ILRS, Pearlman et al. 2002) führen regelmäßig Beobachtungen zu einem Teil der mit Retroreflektoren ausgestatteten GNSS-Satelliten durch. Die aus den bekannten Stationskoordinaten und den Satellitenkoordinaten berechnete Entfernung kann daher mit der Laser-Distanzmessung verglichen werden.

Diese SLR-Residuen für die beiden Galileo-IOV-Satelliten sind in Tab. 3 aufgeführt. Die aus 158 bzw. 178 Normal Points (NPT) bestimmten mittleren Offsets liegen im Bereich etlicher Zentimeter, die dazugehörigen Stan-

Tab. 3: SLR-Validierung der Galileo IOV-Bahnen

Satellit	# NPT	Offset [cm]	STD [cm]
IOV-1	158	-5.5	9.3
IOV-2	178	-6.9	8.2

Standardabweichungen sind kleiner als ein Dezimeter. Diese Werte stimmen gut mit den Tagesgrenzensprüngen aus Tab. 2 überein, die Orbit-Fit RMS-Werte hingegen sind deutlich zu optimistisch. Eine SLR-Validierung für QZSS bzw. Compass ist für den vorliegenden Datensatz aufgrund weniger bzw. gar keiner SLR Normal Points nicht möglich. Die SLR-Validierung der QZSS-Orbits von Steigenberger et al. (2012) ergab einen Offset von etwa zwei Zentimetern und eine Standardabweichung von drei Dezimetern.

3.3 Uhrenparameter

Für die Beurteilung der Stabilität der Satellitenuhren dient im Folgenden die modifizierte Allan Deviation. Die Galileo-IOV-Satelliten sind jeweils mit zwei hochstabilen Wasserstoff-Masern (Ostillo et al. 2009) und zwei Rubidium-Uhren (Droz et al. 2010) ausgestattet. Im verwendeten Zeitraum war auf beiden IOV-Satelliten jeweils eine der beiden Rubidium-Uhren aktiv, nicht die stabileren Maser. Die Galileo Rubidium-Uhr zeigt zwar in Abb. 3 eine gute Stabilität, ist aber sowohl im Kurzzeit- als auch insbesondere im Langzeitbereich der QZS-1-Uhr unterlegen.

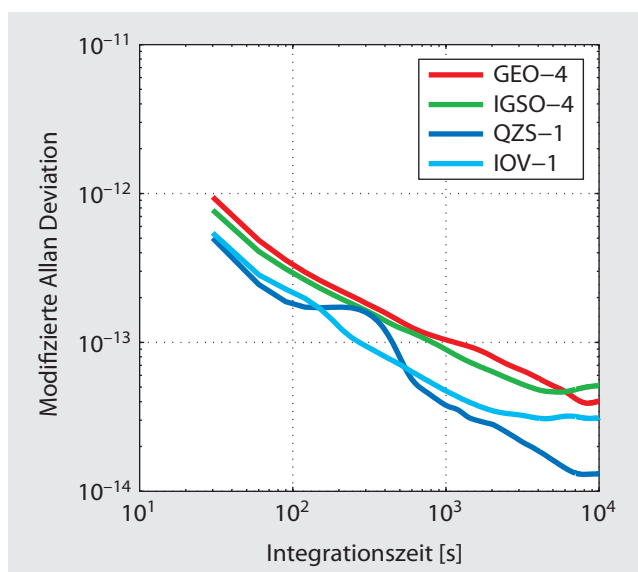


Abb. 3: Modifizierte Allan Deviation von Galileo IOV-1, Compass GEO-4, Compass IGSO-4 und QZS-1 aus Daten des 28. März 2012 (Galileo und Compass) bzw. 25. Mai 2012 (QZSS)

QZS-1 ist mit demselben Typ hochgenauer Rubidium-Uhr ausgestattet wie die neuen GPS Block IIF Satelliten. Jedoch wird die für den Nutzer sichtbare Uhr durch ein vom Zeithaltungssystem des Satelliten verursachtes Signal mit einer Periode von etwa 15 Minuten beeinträchtigt (Steigenberger et al. 2012). Dies macht sich in Abb. 3 im Buckel der Allan Deviation bei etwa 400s bemerkbar. Für Compass ist exemplarisch jeweils ein IGSO- und GEO-Satellit gezeigt. Die Stabilität dieser Uhren ist um etwa einen Faktor zwei schlechter als die der IOV-Satelliten.

4 Precise Point Positioning

Im Gegensatz zu Galileo bietet Compass derzeit bereits eine ausreichende Satellitenanzahl, um eine Positionierung ausschließlich mit diesem GNSS in einem regional begrenzten Gebiet durchzuführen. Anhand der im vorigen Abschnitt beschriebenen Compass Bahn- und Uhrenparameter wurde für eine statische GNSS-Station in Melbourne (Australien) eine PPP-Lösung berechnet: Neben den Stationskoordinaten und Empfängeruhrparametern wurden noch Troposphärenparameter und Ambiguities geschätzt. Die Beobachtungsgeometrie ist allerdings relativ schlecht, da sich die meisten Compass-Satelliten die überwiegende Zeit im nord-westlichen Quadranten befinden (s. Abb. 4). Es sind zwischen fünf und acht Satelliten

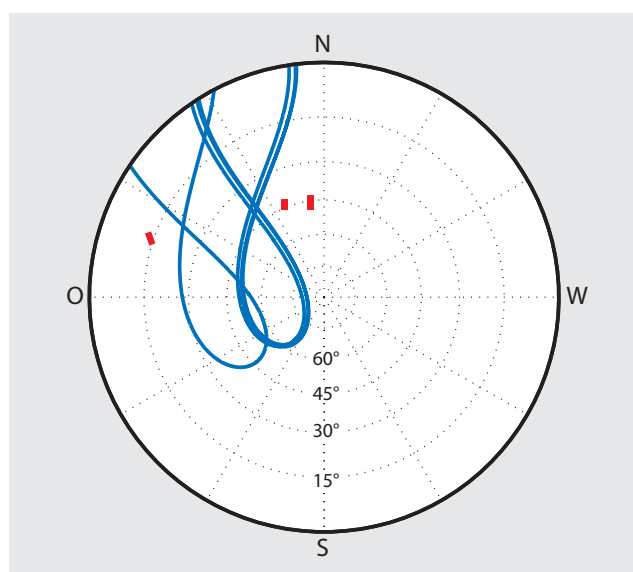


Abb. 4: Satellitensichtbarkeit der Compass GEO- (rot) und IGSO-Satelliten (blau) für die Station Melbourne

gleichzeitig sichtbar, die GDOP-Werte schwanken dadurch zwischen 3,6 und 8,2. Als Qualitätsindikator dient der RMS der fünf Tageslösungen gegenüber den GPS-basierten Stationskoordinaten (s. Tab. 4). Die mit Compass momentan erreichbare Genauigkeit liegt bei einigen Zentimetern. Aufgrund der ungünstigen geometrischen Verteilung der Satelliten am Horizont und der Tatsache, dass die Ambiguities nicht auf ganzzahlige Werte fixiert wurden, ist die Ost-West-Komponente um etwa einen Faktor zwei schlechter als die Nord-Süd-Komponente.

Um die Bedeutung der GEOs zu verdeutlichen, enthält Tab. 4 auch eine Lösung, die ausschließlich auf den Beobachtungen der IGSO-Satelliten beruht. Wie im

Tab. 4: RMS-Werte der aus Compass-Beobachtungen bestimmten Koordinaten einer statischen GNSS-Station in Melbourne gegenüber den entsprechenden GPS-Werten

Satelliten	Nord [cm]	Ost [cm]	Höhe [cm]
IGSO + GEO	1.7	4.1	6.4
IGSO	2.0	5.1	11.7

vorigen Abschnitt dargestellt, ist die Bahnengenauigkeit der GEO-Satelliten deutlich schlechter als die der IGSO-Satelliten. Dennoch tragen die GEO-Satelliten insbesondere zu einer Verbesserung der Höhenkomponente um einen Faktor von etwa zwei bei und auch die horizontalen Komponenten werden um 15 bis 20% verbessert.

5 Ausblick

In diesem Artikel wurden exemplarische Ergebnisse der neuen Satellitennavigationssysteme Galileo, Compass und QZSS vorgestellt. Aufgrund der begrenzten Satellitenzahl dieser Systeme wurde ein Zwei-Schritt-Verfahren angewendet, bei dem die GPS-Beobachtungen zur Bestimmung der Koordinaten, Troposphären- und Empfängeruhrparameter verwendet werden. Die dabei erzielte Bahnengenauigkeit liegt im Dezimeterbereich und ist damit um etwa einen Faktor zehn schlechter als die zurzeit erreichbare Genauigkeit für GPS und GLONASS. Ein momentan die Genauigkeit der Bahnen und Uhren begrenzender Faktor ist auch die begrenzte Stationsanzahl, ein Problem, das aber in naher Zukunft durch die zunehmende Verbreitung entsprechender Multi-GNSS-Empfänger gelöst werden dürfte.

Ein mittelfristiges Ziel muss jedoch die konsistente Auswertung aller GNSS in einem einzigen Schritt sein. Die korrekte Behandlung der Biases zwischen verschiedenen Signalen und verschiedenen GNSS ist ein kritischer Punkt für die Genauigkeitssteigerung einer Multi-GNSS-Lösung gegenüber entsprechenden Einzel-GNSS-Lösungen. Die Entwicklung und Erprobung neuer Algorithmen zur Fixierung der Ambiguitäten unter Ausnutzung der neuen Frequenzen stellt einen weiteren wichtigen Forschungsaspekt für die nahe Zukunft dar.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Curtin University (Perth, Australien), der Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), der Firma Trimble und dem IGS MGEX-Projekt für die Bereitstellung von Multi-GNSS-Daten.

Literatur

Benedicto J., Gatti G., Garutti A., Paffet J., Bradford A., Jackson C., Rooney E.: The triumph of GIOVE-A – the first Galileo satellite. *ESA Bulletin*, 127: S. 62–69, 2006.

Beutler G., Brockmann E., Gurtner W., Hugentobler U., Mervart L., Rothacher M., Verdun A.: Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for Geodynamics (IGS): theory and initial results. *Manuscripta Geodaetica*, 19: S. 367–386, 1994.

Bonnor N.: A brief history of global navigation satellite systems. *The Journal of Navigation*, 65(1): S. 1–14, 2012. doi:10.1017/S037346311000506.

China Satellite Navigation Office: BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document (Test Version). Technical report, 2011.

Dach R., Brockmann E., Schaer S., Beutler G., Meindl M., Prange L., Bock H., Jäggi A., Ostini L.: GNSS processing at CODE: status report. *Journal of Geodesy*, 83(3–4): S. 353–365, 2009. doi:10.1007/s00190-008-0281-2.

Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. (Hrsg.): *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern, 2007.

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C.: The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83(3–4): S. 191–198, 2009. doi:10.1007/s00190-008-0300-3.

Droz F., Rochat P., Wang Q.: Performance overview of space rubidium standards. In: 24th European Frequency and Time Forum, 2010. www.congex.nl/EFTF_Proceedings/Papers/Session_15_GNSS_Timing_2/15_01_Droz_Fabien.pdf.

ESA: GIOVE Experimentation Results: A Success Story. Technical Report SP-1320, European Space Agency, Noordwijk, 2011.

García Á., Píriz R., Fernández V., Navarro-Reyes D., González F., Hahn J.: GIOVE orbit and clock determination and prediction: Experimentation results. In: *Proceedings of ENC GNSS 2008*, 2008.

Gong H., Yang W., Wang Y., Zhu X., Wang F.: Comparison of short-term stability estimation methods of GNSS on-board clock. In: Sun J., Liu J., Yang Y., Fan S. (Hrsg.), *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 160, S. 503–513, Springer, 2012. doi:10.1007/978-3-642-29175-3_46.

GPS World: Galileo IOV satellites now in orbit. *GPS World*, 22(11): S. 14, 2011.

Gurtner W., Estey L.: RINEX, The Receiver Independent Exchange Format, Version 3.01. Technical report, 2009. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex301.pdf>.

Hahn J., González F., Waller P., Navarro-Reyes D., Píriz R., Mozo A., Fernandez V., Cueto M., Tavella P., Sesia I.: GIOVE-A apparent clock assessment and results. In: 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, S. 95–114, 2007. www.pttimeeting.org/archivemeetings/2007papers/paper9.pdf.

Hauschild A., Steigenberger P., Rodriguez-Solano C.: Signal, orbit and attitude analysis of Japans first QZSS satellite Michibiki. *GPS Solutions*, 16(1): S. 127–133, 2012. doi:10.1007/s10291-011-0245-5.

Inaba N., Matsumoto A., Hase H., Kogure S., Sawabe M., Terada K.: Design concept of Quasi Zenith Satellite System. *Acta Astronautica*, 65(7–8): S. 1068–1075, 2009. doi:10.1016/j.actaastro.2009.03.068.

Jun X., Jingang W., Hong M.: Analysis of Beidou navigation satellites in-orbit state. In: Sun J., Liu J., Yang Y., Fan S. (Hrsg.), *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 161, S. 111–122, Springer, 2012. doi:10.1007/978-3-642-29193-7_10.

Kirchner M., Schmidt R., Vilzmann J.: Results of GIOVE data processing to allow evaluation of principal system performance drivers. In: *Proceedings of the European Navigation Conference – Global Navigation Satellite Systems*, 2009. www.baynavtech.com/papers/results_GIOVE-data-processing.pdf.

Kishimoto M., Myojin E., Kawate K., Miyoshi M., Kogure S., Noda H.: Technical verification status of Quasi-Zenith Satellite System. In: *Proceedings of ION ITM 2012*, S. 1223–1227, The Institute of Navigation, Manassas, 2012.

Kishimoto M., Myojin E., Kogure S., Noda H., Terada K.: QZSS on orbit technical verification results. In: *Proceedings of ION GNSS 2011*, S. 1206–1211, The Institute of Navigation, Manassas, 2011.

Langley R.: Constellation updates from ION GNSS 2011. *GPS World*, 22(11): S. 16–17, 2011.

Malik M., Gatti G., Alpe V., Johansson M., Kieffer R., Robertson G.: GIOVE-B satellite & payload overview. In: *Proceedings of the European Navigation Conference – Global Navigation Satellite Systems*, 2009.

Menge F.: Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. Nr. 247 in *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover*, 2003.

Montenbruck O., Hauschild A., Hessels U.: Characterization of GPS/GIOVE sensor stations in the CONGO network. *GPS Solutions*, 15(3): S. 193–205, 2010. doi:10.1007/s10291-010-0182-8.

- Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P., Hugentobler U., Teunissen P., Nakamura S.: Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system. *GPS Solutions*, 2012. doi:10.1007/s10291-012-0272-x.
- Ostillo A., Johansson M., Hannes D., Malik M., Resti A., Waller P., Belloni M., Droz F., Mosset P.: Passive hydrogen maser (PHM): the heart of the Galileo navigation payload. In: Proceedings of the European Navigation Conference – Global Navigation Satellite Systems, 2009.
- Pearlman M., Degnan J., Bosworth J.: The International Laser Ranging Service. *Advances in Space Research*, 30(2): S. 125–143, 2002. doi:10.1016/S0273-1177(02)00277-6.
- Sakai T., Yamada H., Ito K.: Ranging quality of QZSS L1-SAIF signal. In: Proceedings of ION ITM 2012, S. 1255–1264, The Institute of Navigation, Manassas, 2012.
- Sawamura T., Takahashi T., Moriguchi T., Ohara K., Noda H., Kogure S., Kishimoto M.: Performance of QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) & L-band navigation payload. In: Proceedings of ION ITM 2012, S. 1228–1235, The Institute of Navigation, Manassas, 2012.
- Schönemann E., Springer T., Otten M., Becker M., Dow J.: GIOVE-A precise orbit determination from microwave and satellite laser ranging data – first perspectives for the Galileo constellation and its scientific use. In: Proceedings of the First Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme 2007, 2007. http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/2007_Schoenemann_Toulouse_paper.pdf.
- Shi C., Zhao Q., Hu Z., Liu J.: Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites. *GPS Solutions*, 2012. doi:10.1007/s10291-012-0264-x.
- Steigenberger P., Hauschild A., Montenbruck O., Rodriguez-Solano C., Hugentobler U.: Orbit and clock determination of QZS-1 based on the CONGO network. In: Proceedings of ION ITM 2012, S. 1265–1274, The Institute of Navigation, Manassas, 2012.
- Steigenberger P., Hugentobler U., Montenbruck O., Hauschild A.: Precise orbit determination of GIOVE-B based on the CONGO network. *Journal of Geodesy*, 85(6): S. 357–365, 2011. doi:10.1007/s00190-011-0443-5.
- Weber R.: IGS GNSS Working Group. In: Meindl M., Dach R., Jean Y. (Hrsg.), *International GNSS Service Technical Report 2011*, S. 159–163. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2012.
- Zeimet P.: Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2010.

Anschrift der Autoren

Peter Steigenberger | Urs Hugentobler
Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München
steigenberger@bv.tum.de

Andre Hauschild | Oliver Montenbruck
German Space Operations Center
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Münchner Straße 20, 82234 Weßling