

Status der Modernisierung von GPS und GLONASS und Perspektiven weiterer GNSS*

Matthias Becker

Zusammenfassung

In den letzten beiden Jahren wurden erhebliche Fortschritte bei der Modernisierung von GPS und GLONASS erzielt. Dreißig Jahre nach der ersten Nutzung von GPS ist das Modernisierungsprogramm in vollem Gange und die Entwürfe für die dritte Generation der Satelliten sind beauftragt. Erste Resultate mit den modernisierten Signalen von GPS und Untersuchungen für die Nutzung der drei Frequenzbänder ergaben deutliche Verbesserungen in einigen Anwendungsszenarien. Für GLONASS ist die Vervollständigung der Konstellation in 2009 zu erwarten und der Übergang auf das zu GPS und GALILEO kompatible Kodierungsverfahren wird die gemeinsame Nutzung von mehreren Satellitensystemen vereinfachen. Die Vielzahl der Satellitensysteme – einschließlich des chinesischen COMPASS und regionaler Systeme – sowie der Anwendungen werden neue Anforderungen an Empfänger und Auswertesoftware stellen. Hier werden die neuesten Entwicklungen bei den Globalen Satellitennavigationssystemen – mit Ausnahme von GALILEO – und beispielhaft die Verbesserungen und Konsequenzen für die Anwender aufgezeigt.

Summary

In the recent years major improvements were made in the modernization of both GPS and GLONASS. Thirty years after the initial operation capability of GPS the modernization programme is at its peak and the design of the next generation is commissioned. The first results of the use of modernized signals and studies on the use of three carrier-frequencies indicate clear improvements for some application scenarios. For GLONASS the completion of the constellation is expected in 2009 and the declared transition to the coding technique of GALILEO/GPS will enable the full compatibility and joint use of the global systems. The multitude of global navigation satellite systems, including the Chinese COMPASS and regional systems, and their applications puts great demands on receivers and analysis-software. Here, we outline the latest developments in global satellite navigation and the expected benefits for the users. GALILEO will be treated in a separate article.

1 Einleitung

Die Entwicklung der Satellitennavigationssysteme erfolgt wegen der langen Vorlaufzeiten, der komplexen technischen Fragestellungen und nicht zuletzt der politischen Einflussnahmen in längeren Zeitintervallen. Trotzdem sind in den zwei Jahren seit dem im DVW-Seminar zum

Globalen Positionierungssystem (GPS) und zum europäischen Satellitennavigationssystem GALILEO im Jahre 2006 beschriebenen Stand (Becker 2006) einige neue Aspekte in die Planung aufgenommen worden und konkrete Fortschritte bei der Konzeption und Realisierung der Systeme zu beobachten. Da die Darstellung des Standes von GALILEO eines eigenen Beitrags bedarf, wird dieses System hier nicht detailliert behandelt. Dreißig Jahre nach der ersten Nutzbarkeit von GPS mit vier NAVSTAR-Satelliten im Orbit (Start von NAVSTAR IV am 11. Dezember 1978), ist der Sprachgebrauch GNSS, für »Globales Satellitennavigationssystem«, jetzt zum Plural »System der Globalen Systeme« mutiert. Neben GPS sind das russische GLONASS, GALILEO und das chinesische COMPASS im Aufbau. Dazu werden in Indien und Japan regionale Satellitennavigationssysteme entwickelt, die im Zusammenspiel mit den globalen Systemen deutlich verbesserte Positionierungsgenauigkeiten erlauben. Folgende Navigations- und Erweiterungssysteme sind vorhanden oder im Aufbau, siehe auch Tab. 1:

- USA: GPS, GPSIII, WAAS (Wide Area Augmentation System) im Gebiet von Amerika und LAAS (Local Area Augmentation System) an Flughäfen.
- China: COMPASS/Beidou Navigation Satellite System (CNSS),
- European Union: GALILEO und der »European Geostationary Navigation Overlay Service« (EGNOS) als regionale Erweiterung,
- Indien: das Erweiterungssystem GAGAN (GPS and Geo-Augmented Navigation System) und das regionale System IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System),
- Japan: das regionale System QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) und das auf den »Multifunction Transport Satellites« (MTSAT) beruhende Erweiterungssystem MSAS (Satellite Augmentation System),
- Russian Federation: GLONASS und das Erweiterungssystem SDCM (System of Differential Corrections and Monitoring).

Die oben erwähnten Länder sind im Internationalen Komitee zu GNSS (ICG), das vom Büro der Vereinten Nationen für Raumfahrtangelegenheiten (»United Nations Office for Outer Space Affairs«) unterstützt wird, organi-

* Überarbeitete Fassung des Vortrages beim 83. DVW-Seminar »GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen« am 18. und 19. März 2009 in Dresden. Die Seminarbeiträge sind als Band 57 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden.

siert. Dort soll die weitere Entwicklung koordiniert und abgestimmt werden.

Andere Weiterentwicklungen für kommerzielle Systeme sind angedacht. So wurde z.B. anlässlich des GNSS08 Symposiums in Tokio ein Konzept für ein »low cost« GNSS vorgestellt, das nur für einen begrenzten geografischen Bereich kostengünstig mit wenigen Satelliten eine Navigation ermöglichen könnte (Lainez und Romey 2008). Der zivile Bereich ist ein unverzichtbarer Teil der Anwendungen der GNSS geworden und hat wesentlichen Einfluss auf den Entwurf der Nachfolgesysteme von GPS und GALILEO. Die für die sicherheitskritischen Anwendungen in der Luftfahrt geforderten Integritätsinformationen und die daraus resultierenden Systemeigenschaften im Raum- und Bodensegment sind wichtige Parameter für die Entscheidung über die Systemauslegung auch bei GPS III. Weiterhin sind die Resistenz gegen beabsichtigte oder zufällige Störungen und eine ausreichende Verfügbarkeit wesentliche Kriterien.

Im Folgenden werden zunächst der Status und die neuen Komponenten der Systeme vorgestellt. Danach wird anhand von einzelnen Untersuchungen die Signalqualität und die Verbesserungen der Datenqualität gezeigt. Perspektiven für zukünftige Empfänger und Software sowie die integrierte Betrachtung der zukünftigen Entwicklung schließen den Beitrag ab.

2 GPS Modernisierung

2.1 Raumsegment

Gegenwärtig, im April 2009, sind 30 Satelliten in Betrieb, davon elf GPS IIA, zwölf GPS IIR und sieben GPS IIR-M. Ein weiterer GPS IIR-M Satellit ist für den Start vorbereitet, ebenso ein GPS II-F Satellit mit der dritten zivilen Frequenz L5. Die IIR-M Satelliten übertragen das neue zivile L2C-Signal. Die Konstellation erfüllt seit 1993 die Spezifikationen für die Genauigkeit der reinen Streckenmessung (SIS, Signal in Space, und URE, User Range Error). Die Modernisierung des GPS hat dabei zu einer deutlich besseren Genauigkeit für die Signale geführt. Gegenwärtig werden etwa 0,92 m als mittlerer Streckenfehler erhalten (Madden 2008). Zum Vergleich: der GLONASS URE liegt zurzeit bei etwa 1,8 m. GPS IIR-20 (M7, SVN 49) mit einer Testversion des L5-Signals wurde am 24. März 2009 gestartet. Das L5-Signal enthält nur eine mit dem Pseudo-Zufallskode 63 (PRN63) modulierte datenfreie Komponente; sie ist hauptsächlich zum Testen von Empfängern und als Platzhalter gedacht und kann nicht für die Navigation benutzt werden. Mit der Abstrahlung der Signale auf der L5-Frequenz ist der dafür geschützte Frequenzbereich für GPS reserviert. Weitere Starts von IIR-21 (M8, SVN 50) und IIF-1 werden im Sommer 2009 erfolgen.

Das US Department of Defense hat angekündigt, dass ab Herbst 2009 die neuen Navigationsmessages (CNAV) auf der L2C-Frequenz eingerichtet werden. Dazu wird eine neue Software auf die acht (dann hoffentlich verfügbaren) modernisierten GPS IIR-M Satelliten aufgespielt werden. Die neue zivile Nachrichtenstruktur beinhaltet mehrere signifikante Verbesserungen gegenüber den bisher auf L1 übertragenen Broadcast-Messages. Die Sendeleistung ist stärker und die Dekodierung ist robuster, L2C-Empfänger werden L2 mit 10 bis 20 dB größerer Signalstärke empfangen können. Weiterhin wird sie eine flexible Datenstruktur mit wechselnder Blocklänge und variablen Sendeintervallen haben, die die starre Rahmenstruktur der bisherigen Navigationsnachricht ablöst. Die im Interface Kontrolldokument ICD-GPS-200D (NAVCEN 2009) beschriebene Struktur erlaubt bis zu 63 verschiedene Messagetypen. 15 CNAV-Datenrahmen werden zunächst verfügbar sein. Der erste verfügbare Datensatz, Message Typ 0, wird die Satelliten-PRN-Nummer enthalten und die GPS-Zeitinformation in Intervallen von zwölf Sekunden. Auch das neue Signal auf der L5-Frequenz – sobald mit den GPS IIF- und GPS III-Satelliten verfügbar – wird die CNAV-Messages enthalten. Alle offiziellen GPS-Dokumente und Spezifikationen sind auf der Webseite des US Coast Guard (NAVCEN 2009) zu finden. Hier ist auch das neue Dokument mit den aufdatierten Werten des SPS-Performance Standards für den Standardpositionierungsdienst zu finden.

Der Zeitplan der Erneuerung des Raumsegmentes hat sich damit gegenüber den in Becker (2005) publizierten Terminen um etwa zwei Jahre verzögert, allerdings ohne Beeinträchtigung der Nutzbarkeit des Systems. Die weitere Planung sieht den Start der 19 Block IIF im Zeitraum 2009 bis 2012 und den Start der etwa 30 Block III Satelliten ab etwa 2014 vor. Lockheed Martin hat die grundlegenden Konstruktionsmerkmale der Block III Satelliten festgelegt. Dazu wurden die wesentlichen Kosten, der Zeitplan und die technischen Spezifikationen definiert. Sie sollen Mitte 2009 endgültig bestätigt werden und die ersten zwei Satelliten sollen danach bis 2014 fertiggestellt werden. Die weitere Entwicklung wird schrittweise in acht Block IIIB und 16 Block IIIC Satelliten mit jeweils weiterentwickelter Technologie vorangehen. Die Block III Satelliten werden wegen der Möglichkeit der direkten Kommunikation von Satellit zu Satellit dann von einer einzigen Bodenstation aufdatiert werden können, was zu schnelleren Fehlermeldungen, aktuelleren Ephemeriden und besserer Störsicherheit führen wird. Der erwartete URE für die Block III Konstellation wird ab 2016 mit 0,25 m noch einmal wesentlich besser als die gegenwärtig im Präzisen Positionierungsservice oder im Standard-Positionierungsservice erreichten Werte.

Verbunden mit diesen Neuerungen, droht dann auch die Abschaffung der bisherigen GPS-Signale auf der L2-Frequenz. Die auf dem P-Code basierende »semi-codeless«-Signalakquisition wird ab dem 31. Dezember 2020 nicht mehr möglich sein. Der P-Code auf L1 und L2 wird dann

nicht mehr unterstützt und die Verwendung aller konventionellen Zweifrequenzempfänger aus den 1980er, 1990er und jetzigen Jahren wird nicht mehr garantiert. Grund für dieses Datum ist die Tatsache, dass plangemäß ab dann die neuen L2C- und L5-Signale von mindestens 24 Satelliten verfügbar sein werden. Die Block III Satelliten werden dann auch das vierte zivile Signal L1C ausstrahlen. Die lange Vorlaufzeit soll die Anpassung und Planung der Neubeschaffung von Empfängern durch die Nutzer erleichtern und Fehlinvestitionen vermeiden helfen. In Anbetracht der enormen Anzahl von geodätischen Zweifrequenzempfängern in den Referenzstationsnetzen, wo zurzeit sicher schon mehrere zehntausend Empfänger, mit stark zunehmender Tendenz, weltweit installiert sind, ist diese Information als Planungsgrundlage von großer Bedeutung.

Interessant, z.B. im Rahmen der Betrachtungen der Integrität für sicherheitskritische Anwendungen wie Landeanflüge, ist die Statistik der Fälle von korrupten Signalen der GPS-Satelliten. Es zeigt sich nach einer Untersuchung von Enge (2008), dass es seit 1993 im Wesentlichen nur drei Fälle von fehlerhaften Ephemeriden, etwa zwei bis drei fehlerhafte Satellitenuhren mit starker Drift und etwa 24 kleinere Anomalien gegeben hat. Ein Beispiel sind die im Oktober 2007 beobachteten fehlerhaften Daten. In der Zeit vom 8. bis 10. Oktober 2007 wurden bei fünf Block IIR- und einem Block IIR(M)-Satelliten über zwei bis zwölf Stunden korrupte Daten übertragen. Dabei wurde zwar ein L1 C/A Code-Signal übertragen, aber die Navigationsdaten waren unbrauchbar. Die Ursache lag in einem fehlerhaften Speichern der vom Kontrollsegment an die Satelliten übertragenen Nachrichten. Durch eine in diesem Fall zum ersten Mal aufgetretene Konfiguration hat die Übertragungssoftware die Daten in einen Speicherbereich geschrieben, der zur fehlerhaften Berechnung der Navigationsdaten im Bordcomputer der betroffenen Satelliten führte. Nach Analyse der Probleme und Problemidentifikation wurden die Upload-Software korrigiert und die Daten neu übertragen. Seitdem ist diese Fehlerursache ausgeschlossen. Die Fehlerbehebung wurde dabei wesentlich durch die neuen Möglichkeiten der seit September benutzten, »Architecture Evolution Plan« genannten neuen Master-Control Stationssoftware beschleunigt.

Im Hinblick auf die Reaktion der vielen unterschiedlichen GPS-Empfänger und der generellen Behandlung von solchen Anomalien traten einige interessante Fragen auf. Manche Empfänger konnten mit alten Almanachdaten noch weiter verfolgt werden, andere haben keine Pseudorange mehr ausgegeben. Berechnete Pseudorange hatten Fehler im 10 bis 100km-Bereich und waren nicht zu benutzen. Hier ergeben sich jetzt neue Kriterien für die Zuverlässigkeit und Nutzbarkeit von Code- und Navigationsdaten, die in einer nächsten Version des Interface Control Documents behandelt werden sollten. Es ist in-

teressant, dass über 20 Jahre nach Inbetriebnahme und 14 Jahre nach der Erklärung der vollen Operationalität immer noch Überraschungen auftreten können. Enge (2008) fordert daher und aus dem Wunsch nach 100%iger Verfügbarkeit in allen Anwendungsbereichen eine Konstellation mit mehr als 30 Satelliten bei GPS III und multiple GNSS für eine solide Redundanz durch Interoperabilität.

Ähnlich wie GALILEO wird auch das GPS III Such- und Rettungsaktionen unterstützen. Dies wird gegenwärtig von der NASA untersucht. Da das COSPAS-SARSAT System, das über 800.000 Notfallbaken unterstützt, eingestellt werden soll, soll der Ersatz auf GALILEO-, GPS- und GLONASS-Satelliten verfügbar gemacht werden.

2.2 Bodensegment

Die Modernisierung des Bodensegmentes nach dem »GPS Architecture Evolution Plan« (AEP) mit dem Ausbau des globalen Tracking-Netzes auf 17 Stationen und der entsprechenden Infrastruktur der zwei redundanten Operationszentralen verläuft planmäßig. Am 14. September 2007 wurde der Betrieb von der alten Master Control Station auf das neue Operationszentrum auf der Schriever Air Force Base in Colorado Springs, Colorado, übergeben. Wesentliche Verbesserungen sind neue Rechner und Software zur Berechnung der Navigationsmeldungen, ein neues Statusüberwachungsprogramm für die Satelliten, mehr Antennen zur Kommunikation und Verbesserung der Software der Bodenantennen mit digitaler Kommunikation. Damit wurde die Möglichkeit der Kommunikation mit den GPS-Satelliten von 92,7% derzeit auf 94,5% erhöht. Mit der erhöhten Zahl von GPS-Empfängern als Monitorstationen können nun die GPS-Signale 100% der Zeit überwacht werden, in 99,8% der Bahnen sogar redundant. Eine zweite Master Control Station ist auf dem Flughafen Vandenberg in Kalifornien installiert. Für GPS III ist die Entwicklung eines neuen operationellen Kontrollsegmentes mit dem Namen »OCX« geplant und beauftragt. Damit wird die Vorwarnzeit bei fehlerhafter Satellitenfunktion verkürzt und die Genauigkeit der Produkte weiterhin kontinuierlich verbessert.

2.3 Generelle Politik

Die US-Politik zu Positionierung, Navigation und Zeithaltung zielt konsequent auf die kombinierte militärische und zivile Nutzung ab. GPS III wird ohne Selective Availability, d.h. ohne die Möglichkeit der willkürlichen Signalverschlechterung, gebaut werden. Der Betrieb erfolgt durch das Militär, die Kosten dafür werden durch Steuern und Effizienzgewinn in der zivilen Nutzung mehr als aufgebracht. So werden z.B. mehr als sieben Millionen US-Dollar aus Steuermitteln für die Entwicklung von zivilen Optionen des GPS an die Luftwaffe gegeben.

Direkte Gebühren sind in dieser Politik keine Option. Alle Ministerien, auch Landwirtschaft und Innenministerium der USA, sowie das US-Landesvermessungsamt (NGS) mit dem nationalen DGPS-Netz »CORS« sind in die Planungen zur weiteren Entwicklung mit einbezogen. Dabei ist das erklärte Ziel, immer die besten Spezifikationen und Genauigkeiten aller verfügbaren Systeme zu bieten. Die internationale Zusammenarbeit ist daher ein Kernpunkt der weiteren Entwicklung, nicht zuletzt auch wegen der in Bezug auf die sicherheitskritischen militärischen Anwendungsmöglichkeiten notwendigen Abstimmung. Alle Entwicklungen sind öffentlich zugänglich und werden in Internet-Portalen zur Verfügung gestellt, siehe z.B. <http://pnt.gov>.

3 GLONASS

GLONASS befindet sich im siebten Jahr einer auf elf Jahre ausgelegten Modernisierungsphase. Die Konstellation besteht im Januar 2009 aus 20 Satelliten, aktuelle Informationen zu GLONASS sind auf den Internetseiten des Informationszentrums der Russischen Raumfahrtagentur (www.glonass-ianc.rsa.ru) zu finden. Die am 25. Dezember 2008 gestarteten Satelliten Cosmos-2447, Cosmos-2448 und Cosmos-2449 ergänzen die drei Satelliten in der ersten Orbitalebene. Zurzeit liegt die globale Verfügbarkeit (gemessen an einem PDOP größer als sechs) bei etwa 94%. Ende 2009 sollen mit 22 Satelliten 99,7% und Ende 2010 mit 24 Satelliten praktisch 100% erreicht werden. Damit wäre 2010 die volle Operationalität (FOC, Full Operation Capability) erreicht. Eine Erweiterung der Konstellation auf 30 Satelliten ist nun definitiv geplant.

Das Bodensegment besteht aus einer Master-Kontrollstation, drei kombinierten Monitoring-, Telemetrie-, Uhren- und Uplink-Stationen, wovon zwei mit Satelliten-Laserranging ausgerüstet sind, zwei reinen Telemetriestationen und sechs zusätzlichen Monitorstationen, alle im Gebiet Russlands (Revnivykh 2008). Eine Ausweitung auf Regionen außerhalb Russlands ist geplant, dadurch wird sich mit der verbesserten globalen Abdeckung auch der URE verbessern.

Der Ausbau der Raum- und Bodensegmente hat sich in deutlichen Verbesserungen der GLONASS-Produkte ausgewirkt. Die Übereinstimmung der Broadcast-Ephemeriden mit dem Internationalen Terrestrischen Referenzsystem ITRF ist nach der Umstellung des GLONASS-Systems auf die verbesserte Version des nationalen, geozentrischen Koordinatensystems »Earth Parameters 1990« (PZ-90.02) am 20. September 2007 von etwa 50 m auf 5 bis 7 m verbessert worden. Der UERE, also der systemabhängige Streckenfehler, hat sich gleichzeitig von 3,5 m (entsprechend etwa dem im ICD angegebenen Wert von 3,7 m) auf 1,8 m verbessert. Über einen Zeitraum mehrerer Stun-

den hinweg wurden die Broadcast-Ephemeriden der einzelnen Satelliten auf das neue System umgestellt. Das neue PZ-90.02 orientiert sich am Internationalen Terrestrischen Referenzrahmen ITRF2000. Dadurch soll sich die Transformation zwischen beiden Systemen auf drei Translationen reduzieren. Sie werden von den Systembetreibern mit Delta X: -36 cm, Delta Y: +8 cm, Delta Z: +18 cm angegeben.

Die Stabilität der GLONASS-M Cäsiumuhren ist für die meisten Satelliten im Bereich von $0,2 \times 10^{-13}$ bis $0,8 \times 10^{-13}$. Weitere Verbesserungen für Software und Modelle sowie Koordinaten- und Zeitsystem sind geplant.

Die Chancen zur Vereinheitlichung der GNSS sind sehr gut. Speziell für GLONASS bringt der geplante Übergang auf die gleiche Modulationsart wie bei GPS wesentliche Fortschritte. Die bisherigen Probleme der kanalabhängigen Zeit-Offsets bei GLONASS, die auf Grund der Verwendung von satellitenabhängig verschiedenen Frequenzen auftraten, werden sehr viel unkritischer werden. Der Wechsel zur CDMA (Code Division Multiple Access) an Stelle von FDMA (Frequency Division Multiple Access) wurde am 15. Februar 2008 von der russischen Regierung angekündigt und die entsprechenden Entwicklungen initiiert. Die Signale werden mit einer binären Offset-Carrier Signalstruktur BOC (2,2) mit einer Mittenfrequenz von 1575.42 MHz und einer BOC (4,4) Signalstruktur bei 1176.45 MHz entworfen. Dies entspricht im Wesentlichen den Mittenfrequenzen von GPS-Signalen auf L1 und L5 und liegt nahe bei den GALILEO- und COMPASS-Signalen. Ein zusätzliches GLONASS FDMA-Signal soll bei L3, bei 1197.648 bis 1212.255 MHz, also etwas unterhalb des GPS M-Code bei L2 im Spektrum liegen. Russland wird die neuen Signale mit der nächsten Generation der GLONASS-K-Satelliten und einem für Ende 2010 vorgesehenen ersten Start implementieren. Damit und mit der Zusage, auch weiterhin die zivilen Signale frei zugänglich zu halten, sind die Weichen für eine Interoperabilität mit den anderen GNSS und die wirtschaftliche Nutzung des Systems im zivilen Sektor dauerhaft gestellt.

4 Andere GNSS

4.1 Übersicht

Tab. 1 zeigt derzeit existierende und geplante Satellitennavigationssysteme. Dabei wird zwischen globalen, regionalen und Augmentierungssystemen mit Berechnung und Übertragung von Korrekturdaten zur Genauigkeitssteigerung unterschieden. Im Folgenden werden das globale COMPASS-System und die beiden regionalen Systeme aus Japan und Indien kurz vorgestellt.

4.2 BeiDou-2/COMPASS

Das COMPASS besteht aus zwei Komponenten: einem regionalen Navigationssystem, das auch zur Kommunikation dient, und einem globalen NSS. Es soll im Endausbau aus 35 Satelliten bestehen. China hat bei der Internationalen Telekommunikations-Union ITU 27 Satelliten im Medium Earth Orbit (MEO) angemeldet. Sie werden in drei Bahnebenen mit einer Inklination von 55° in einer Höhe von 21.500 km kreisen, vergleichbar mit den Orbits von GALILEO. Die Frequenzen liegen bei E5b, E6, E2, E1 oder 1.207,14, 1.268,52, 1.561,1 und 1.589,74 MHz mit QPSK Modulation und CDMA, also interoperabel mit GPS und GALILEO. In Bezug auf die Kodierung der Signale und die Vermeidung von Interferenzproblemen sind gegenwärtig noch Fragen offen, die in bilateralen Verhandlungen zwischen der EU und China diskutiert werden. Der Open Service soll mit Genauigkeiten von 10 m für Position, 0,2 m/s für Geschwindigkeit und besser als 50 ns Zeitgenauigkeit verfügbar sein, ein »authorised Service« mit höherer Genauigkeit und Zuverlässigkeit/Integrität ist ebenso geplant.

Drei weitere geosynchrone Satelliten werden in einer Inklination von 55° und einer Halbachse von 42.160 km das Gebiet Chinas und einen zusätzlichen Randbereich in Asien abdecken.

Fünf geostationäre Satelliten zur Positionierung und Kommunikation sind bei den Längen 58,75°, 80°, 140°, 110,5° und 160° stationiert und seit 2004 operationell. Es ist ein bidirektionales System, in dem auch der Empfänger Daten an den Satelliten senden kann. Die Satelliten senden auf der Frequenz 2491,75 ± 4,08 MHz, die Empfänger auf 1615,68 MHz. Die Bahnbestimmung erfolgt über die drei Monitorstationen Jamushi, Kashi und Zhanjiang.

Diese Satelliten bilden das »Sino Navigation Augmentation System (SNAS)«, ein WAAS/EGNOS-ähnliches raumgestütztes Augmentierungssystem (SBAS). Im Zusammenspiel der regionalen und der globalen Komponente ergeben sich interessante Eigenschaften, wie eine Studie von Hwang und Tsai (2008) zeigt. Durch diese Konfiguration wird das BeiDou/COMPASS-System allein im asiatischen Raum einen DOP-Wert (Dilution of Precision, Maß für die Genauigkeit) garantieren, der dem einer gemeinsamen Nutzung von z. B. GPS und GALILEO überlegen ist. Die Zahl der gleichzeitig sichtbaren Satelliten liegt bei 11 bis 17, gegenüber 8 bis 10 im Falle von GPS oder GALILEO. Bei gleichzeitiger Nutzung von COMPASS und einem anderen System können immer zwischen 20 und 27 Satelliten gesehen werden. Durch die spezielle Kombination der drei Orbits – also der mittleren Erdorbits der Navigationssatelliten, der geostationären Orbits der Kommunikationssatelliten und der geosynchronen Orbits der Satelliten zur regionalen Abdeckung – wird der Empfang besonders in abgeschatteten Gebieten besser sein als der von GPS plus GALILEO. Die globale Performance ist ähnlich, aber regional in Asien gibt es damit große Vorteile des chinesischen Systems.

Der erste MEO-Satellit wurde am 13. April 2007, der zweite am 15. April 2009 gestartet und z. B. schon von den Teams der Stanford Universität getrackt. Wenn die volle Konstellation etwa 2015 operabel sein sollte, würde sie die wesentlichen Funktionalitäten von GPS/WAAS bzw. GALILEO/EGNOS beinhalten. Die ersten zehn Starts sind für 2009 und 2010 vorgesehen.

Tab. 1: Existierende und geplante Satellitennavigationssysteme

Name	Satelliten	Global/Regional/ Erweiterung	Land
GPS	24+	Global	USA
GLONASS	24	Global	Russland
GALILEO	27	Global	Europa
COMPASS	35	Global	China
QZSS	3	Regional	Japan
IRNSS	7	Regional	Indien
WAAS	3	Regionale Erweiterung	USA
MSAS	2	Regionale Erweiterung	Japan
EGNOS	3	Regionale Erweiterung	Europa
GAGAN	3	Regionale Erweiterung	Indien
SDCM	2(?)	Regionale Erweiterung	Russland
SNAS	5 + 3	Regionale Erweiterung	China

4.3 IRNSS

Von der indischen Weltraumagentur ISRO wird seit 2006 das Satelliten-Navigationssystem IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System) entwickelt und in den nächsten vier bis fünf Jahren aufgebaut. Es wird aus einem umfangreichen Boden- und Kontrollsegment und insgesamt sieben Satelliten bestehen, verzichtet also auf die globale Komponente des COMPASS. Hiervon sollen drei in eine geostationäre und vier in einen geosynchronen Orbit mit 29° Inklination gebracht werden, die alle permanent von Indien aus zu verfolgen sind. Der erste IRNSS-Satellit soll voraussichtlich 2010 auf seinen Orbit gebracht werden und könnte dann eine auf 20 m genaue Ortung in ganz Indien und in einem Umkreis von rund 2.000 km liefern.

Die indische Regierung hat ebenfalls die Finanzierung des Wide Area Augmentierungssystems (WAAS) mit dem Namen GAGAN – »GPS-Aided Geo Augmented Navigation« – beschlossen. Mit etwa 169 Millionen Dollar soll

bis 2011 ein EGNOS-ähnliches System für den Zivilluftverkehr aufgebaut werden.

Das System wird von der indischen Raumfahrtagentur und der Airports Authority of India konzipiert und voraussichtlich von einem amerikanisch-indischen Konsortium gebaut und implementiert werden. GAGAN wird die GPS-Satellitensignale überwachen und Korrekturdaten zur Erhöhung der Positionierungsgenauigkeit generieren. Haupteinsatzgebiet wird die zivile Luftfahrt sein. Es wird die L1- und L5-Signale, zwei S-Band-Navigationssignale und Ionosphären- und Troposphärenmodell sowie Uhrkorrekturen mit 50 bits/second übermitteln.

4.4 QZSS

Das »Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)« ist Japans Beitrag zur Satellitennavigation. Es beschränkt sich ebenfalls auf die regionale Komponente, die aber – wie schon für das chinesische System beschrieben – große Vorteile in Kombination mit einem globalen System, hier speziell GPS, haben wird, da die Sichtbarkeit und der erreichbare DOP-Wert für den asiatischen Bereich und die Stadtschluchten und Gebirge Japans optimiert sind.

In Abb. 1 werden die Bahnen von QZSS mit ihrer für geosynchrone Orbits typischen »Achterfigur« gezeigt und in Tab. 2 die in Kombination mit GPS erreichbaren sichtbaren Satellitenzahlen (Wu et al. 2004). Einige weitere Informationen zu den Bahnen und das Interface-Kontrolldokument des QZSS sind auf der Home-Page des Systems unter qzss.jaxa.jp zu finden.

Das Quasi-Zenith Satellite System wird aus drei Satelliten mit gleicher Spur auf der Erde bestehen, der erste Start ist für 2009 vorgesehen. Vier Tracking-Stationen werden dafür in Japan und sechs weitere im asiatischen Raum eingerichtet. Die Satelliten werden in einer elliptischen Bahn mit starker Abplattung (HEO) umlaufen, die zu der acht-förmigen Trajektorie über Asien im Skyplot führt. Die Elevation eines Satelliten wird immer größer als 70° sein und so auch in Straßenschluchten eine

gute Sichtbarkeit gewährleisten. So wird die Verfügbarkeit (PDOP > 6), die für GPS allein 60% beträgt, für das Szenario mit drei QZSS-Satelliten auf mehr als 90% anwachsen. QZSS wird auf L1 (auch mit neuem Code L1C), L2 und L5, L5/E6 senden und als Oszillator einen neuen Typ von Wasserstoff-Maser verwenden. Dazu wird das Signal auf L1 neue Messages unter dem Namen L1-SAIF-Korrektursignale mit Sub-Meter-Genauigkeit und Integ-

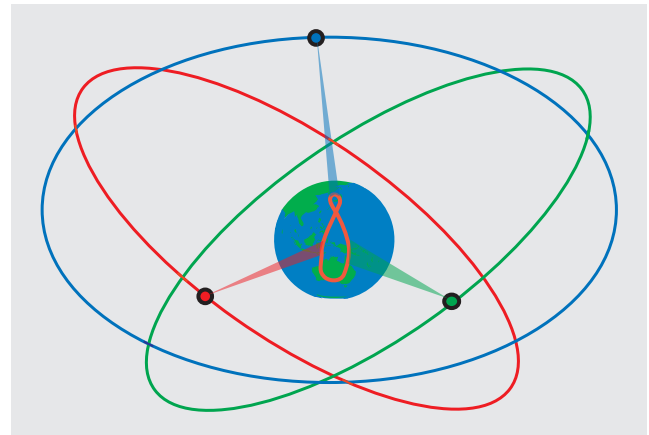


Abb. 1: Geosynchrone Orbits von QZSS

ritätsinformationen liefern. Die Entwicklung von GPS-Stützsensoren im Zentimeter- oder Dezimeterbereich für die Netzwerk-RTK-Technik ist vorgesehen. Durch die hohe Genauigkeit des QZSS mit einem UERE von nur 30 cm (1 Sigma) sollte die Fahrspurerkennung von Autos möglich werden.

Japan baut auch ein SBAS zur Ergänzung von GNSS unter dem Namen MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) mit den Satelliten MTSAT 1 und 2 auf. Die MTSAT-Satelliten kombinieren meteorologische und Kommunikationsdienste. Sie umlaufen die Erde auf einem geostationären Orbit über dem Ostpazifik. MTSAT steht für »Multifunctional Transport Satellite System«. Die Satelliten übertragen Korrektur- und Integritätsdaten für eigenständige Satellitennavigationssysteme (momentan GPS) für das Gebiet Japans. Betrieben wird das System

von der japanischen meteorologischen Behörde und dem Ministerium für Infrastruktur und Transport. Der erste Satellit MTSAT-1R wurde am 26. Februar 2005 mit einer H-IIA-Rakete von Tanegashima aus auf einen geostationären Orbit nahe 140° Ost gebracht. MTSAT-1R ist ein japanischer Nachrichtensatellit, der zusätzlich für die Flugüberwachung und -führung eingesetzt wird. Er unterstützt den Kommunikationsstandard AMSS (Aeronautical Mobile Satellite Service). Flugzeuge können im L-Band über ihn Daten an die Bodenstation

Tab. 2: Leistungsparameter verschiedener GNSS und der Systemkombination für den asiatischen Raum. ZSS = Zahl der sichtbaren Satelliten, HDOP, VDOP, GDOP = horizontaler, vertikaler und geometrischer Wert der Positionsgenauigkeit (Dilution of Precision) (Quelle: Wu et al. 2004).

	ZSS [Min-Max]	HDOP [Min-Max]	VDOP [Min-Max]	GDOP [Min-Max]
GPS	8–10	0.82–1.13	1.53–1.85	1.96–2.76
Galileo	8–9	0.91–1.09	1.56–1.94	2.07–2.55
COMPASS	11–17	0.77–1.02	1.32–1.79	1.73–2.34
2 GNSS	16–19	0.58–0.72	1.03–1.18	1.36–1.53
GPS+COMPASS	20–27	0.54–0.69	0.95–1.14	1.24–1.48
3 GNSS	23–26	0.50–0.58	0.85–0.99	1.13–1.29
2 GNSS + COMPASS	28–36	0.42–0.49	0.71–0.83	1.06–1.22

schicken und auch den Sprechfunk über ihn weiterleiten. MTSAT-2 erreichte am 18. Februar 2006 mit einer H-IIA-Rakete erfolgreich seinen Orbit.

5 Interoperabilität und Integrität

Das System der GNSS mit mindestens vier globalen und regionalen Realisierungen und den drei bis fünf verfügbaren Frequenzen in den modernisierten Versionen der Systeme verspricht große Verbesserungen von Stabilität, Robustheit und Genauigkeit in jedem der Systeme. Die vier Kenngrößen der Systembeurteilung – Genauigkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Kontinuität – werden für das System der Systeme wesentlich verbessert werden. Auch die heute noch bestehenden Probleme in den Inter-System Biases, d. h. der durch die verschiedenen Systemimplementierungen bei Zeitskala, Referenzsystem und den Signalkodierungen auftretenden systematischen Fehler, werden sich deutlich verringern.

Die Grundvoraussetzung dafür, die durch die Aussagen zumindest der Betreiber von GPS, GALILEO und GLONASS unterstützt wird, beinhaltet die Kompatibilität zwischen den verschiedenen Radionavigationssystemen (RNSS). Dazu gehört zum einen die *Interoperabilität*, d. h. nach US-Sprachgebrauch die Tatsache, dass man mit zwei Systemen im Rahmen der spezifizierten Genauigkeit die gleichen Positionsbestimmungen erhält. Zum anderen ist die *Kompatibilität* entscheidend, die besagt, dass die GNSS-Systeme ohne gegenseitige Störung gemeinsam oder separat genutzt werden können, ohne dass die individuellen Signale sich stören und ohne dass die raumfahrtgestützte Kriegsführung beeinträchtigt wird. Die Beschreibung der Übereinstimmung der Systeme wurde in letzter Zeit noch um den Begriff der Austauschbarkeit (*Interchangeability*) erweitert. Darunter versteht man die ideale Situation, in der ein Empfänger mit beliebigen vier Satelliten von vier beliebigen GNSS positionieren kann. Dies hieße dann, dass alle Probleme bezüglich der Inter-System Bias (also der Fragen der Zeit- und Referenzsysteme), der Inter-Channel Bias (also der Unterschiede zwischen den Signalen unterschiedlicher Modulation auf unterschiedlichen Kanälen im Satellit und Empfänger) sowie das Problem des Übersprechens der Signale der verschiedenen Systeme gelöst sein müssten.

Während für GPS und GALILEO – auch wenn wie von Dierendonck (2005) beschrieben, möglicherweise Probleme auftreten können – hier grundsätzlich Übereinkunft herrscht, so ist das bei GLONASS, COMPASS und eventuell weiteren Systemen nicht selbstverständlich und wird noch umfangreicher Verhandlungen bedürfen.

Neben den grundlegenden Eigenschaften jedes Systems, wie Frequenz, Modulationsart, codierte Information, spielen für den Nutzer die einheitlichen Datenformate eine entscheidende Rolle. Alle Signale sollten offengelegt wer-

den und, z. B. im Rahmen von universellen Austauschformaten wie RINEX 3 (Gurtner und Estey 2007) oder den RTCM-Standards, standardisiert und frei verfügbar sein. Dies funktioniert bei den bisherigen Daten sehr gut.

Was bisher noch nicht standardisiert ist und eine eigene Betrachtung erfordert, sind die mit den Echtzeitdaten und Navigationsanwendungen verbundenen Fragen der Integrität, sowohl was die Mechanismen als auch die generellen Konzepte betrifft. Hier müssen die GNSS selbst, die zugehörigen Augmentierungssysteme und letztendlich auch die Empfänger kompatibel und interoperabel sein. Dies wird noch umfangreicher Abstimmungsarbeiten bedürfen, bevor die ganze Welt der GNSS und SBAS barrierefrei und einheitlich von einem Empfänger genutzt werden kann. Ähnlich wie bei der Vermarktung der Mehrwertdienste bei GALILEO kommen bei den Echtzeitanwendungen und Korrekturdiensten kommerzielle Aspekte ins Spiel, die die Vereinheitlichung gefährden könnten. Man kann nur hoffen, dass der freie Zugang zu allen Informationen, wie er mit dem Internationalen GNSS Dienst IGS und den Bemühungen im Zusammenhang mit den internetbasierten Referenzstationsdatendiensten NTRIP des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (Weber et al. 2007) betrieben wird, sich generell durchsetzen wird.

6 Zukünftige Empfänger

Der IGS hat vor kurzem ein Strategiepapier zu neuen Empfängern veröffentlicht (Humphreys et al. 2008). Dabei geht es um die Perspektiven von hochgenauen geodätischen Empfängern im Hinblick auf die zu erwartenden neuen GNSS und die Vielzahl der Signale.

Um die Genauigkeit der IGS-Produkte zu verbessern und um die verbesserten Raumsegmente voll zu nutzen, müssen höhere Anforderungen an die Hersteller von geodätischen Empfängern gestellt werden. Es bedarf besserer Modelle zur Modellierung der GNSS-Beobachtungen im Empfänger und der entsprechenden Dokumentation. Idealerweise sollte der Nutzer Firmware-Internas kennen und eigene Algorithmen verwenden können. Die bisherigen Empfänger werden überflüssig werden, da sie nicht alle verfügbaren Signale verfolgen können.

Eine Möglichkeit für kostengünstige und sehr flexible Empfänger bilden die Software-Empfänger, die als Hauptbestandteil nur ein Hochfrequenzteil zum Empfang und zur Digitalisierung der GNSS-Signale und einen starken Rechner enthalten. Das »Tracken«, also die Signalerfassung, Verfolgung und Decodierung, wird allein durch Software erledigt.

Software-Empfänger sind somit nahezu frei konfigurierbar und erlauben sehr flexible, transparente und anwendungs-spezifische Auslegungen. Dazu könnte – wegen der wenigen spezifisch zu entwickelnden Teile – der Preis sehr gering gehalten werden, er könnte bei wenigen tausend Dollar liegen. Damit sind wesentliche Erweite-

rungen und Verdichtungen des globalen Netzes mit neuen Anwendungen (Meteorologie, Ionosphäre, Deformationsmessungen etc.) möglich.

Für militärische Anwendungen hat die Zukunft mit einer weiteren Strategie schon begonnen. Im Auftrag des US-amerikanischen Militärs wird ein »Nugget« genannter Miniaturempfänger entwickelt, der bahnbrechende Neuerungen beinhalten soll (Rollo 2007). Dazu werden in einem Chip von wenigen Quadratcentimetern Größe ein Software-GPS-Empfänger, mikro-elektromechanische Beschleunigungsmesser und Kreisel (MEMS) sowie als Herzstück eine Miniatur-Atomuhr (CSAC) integriert. Durch diese Kombination von Sensoren lassen sich wesentliche Verbesserungen bei der Leistung des GPS-Empfängers erzielen. Zum einen wird durch die extrem genaue Atomuhr die direkte Akquisition der militärischen Codes ermöglicht, da nicht erst der Empfängeruhrenfehler bestimmt werden muss. Auch die Re-Akquisition nach einem Signalabbruch wird wesentlich schneller.

Durch die MEMS-Inertialmesseinheit wird im Falle von Signalunterbrechungen z.B. in Städten und Wäldern die Position weitergeführt und der erneute Empfang beschleunigt. Die Sensoren plus zusätzliche externe Stützungsdaten – sofern verfügbar – werden in einem weiterentwickelten Kalman-Filter mit verbesserter Genauigkeit und Leistung verarbeitet.

Das Herzstück des Chips, die Atomuhr, ist vom Amerikanischen Institut für Standards (NIST) entwickelt worden. In einem Volumen von 0,4 Kubikzentimetern ist eine komplette Rubidium-Atomuhr mit einer Stabilität von etwa 10^{-11} pro Stunde enthalten. Auch dieses Element beruht auf MEMS-Technologie. Der Energieverbrauch ist mit 10 Milliwatt sehr gering.

Der Nugget-Empfänger wird mechanisch sehr robust und flexibel einsetzbar sein. Seine Vorteile sind:

- eine sehr geringe Anfälligkeit für Störsignale und die Möglichkeit, Signalmanipulationen und Integrität zu prüfen,
- durch die präzise Atomuhr wird die direkte Y- und M-Code-Akquise ermöglicht,
- schnellere Wiederaufnahme des Signaltrackings nach Abrissen,
- ein speziell auf die Zeitstützung optimierter Kalman-Filter,
- eine verbesserte Höhengenaugigkeit wegen der Atomuhr,
- eine gute Genauigkeit auch mit wenigen Satelliten.

Der Prototyp soll Ende 2008 verfügbar sein. Es ist zu hoffen, dass die Technologie bald auf den Markt kommt und dann auch zu erschwinglichen Preisen für die zivilen Empfänger verfügbar gemacht wird. Speziell für die sicherheitskritischen Navigationsanwendungen wird hier ein wesentlicher Fortschritt im Hinblick auf Genauigkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Kontinuität zu erwarten sein.

7 Erste Ergebnisse zu den neuen Signalstrukturen

Durch GALILEO, mit GIOVE A und GIOVE B, sowie mit GPS und den L2C- und L5C-Signalen sind in den letzten zwei Jahren erste praktische Evaluationen der theoretisch vorhergesagten verbesserten Eigenschaften der Signale durchgeführt worden. In Simsky et al. (2006) und Schönemann et al. (2007) wurden die Vorteile der neuen GALILEO-Signale, soweit in deren beschränkter Konstellation jetzt schon möglich, in Bezug auf Multipath und Signalrauschen gezeigt. Generell lässt sich eine Reduktion des Rauschens um einen Faktor von 4 bis 5 und eine Reduktion des Code-Multipath um einen Faktor von 1,2 zeigen.

Für GPS L2C- und L5-Signale sind u. a. Studien zu L5 von Rho und Langley (2008) sowie zu L2C von Sukeová et al. (2007) und Al-Fanek et al. (2007) publiziert worden. Nachdem das L5-Signal noch nicht verfügbar ist, sollen kurz die wesentlichen Ergebnisse von Sukeová et al. (2007) und Leandro et al. (2008) zusammengefasst werden. Inzwischen senden sechs GPS-Satelliten die L2C-Signale ab: es sind die Block IIR-Satelliten M1 bis M6.

Das L2C-Signal ist aus zwei Pseudo-Zufallscodes verschiedener Länge, dem CM oder »Civil-moderate« (ein Code moderater Länge) und dem CL oder »Civil-long« (eine längere Codesequenz) zusammengesetzt. Sie sind dem C/A Code auf L1 sehr ähnlich und die reine Streckenmessgenauigkeit ist vergleichbar. Die Vorteile liegen in ihrer größeren Länge und der ausgewogenen Code-Struktur, so dass wesentlich bessere Autokorrelationseigenschaften entstehen. Zudem ist die Trennung von verschiedenen Satelliten (= Codes) im Empfänger wesentlich robuster. Das Übersprechen von starken auf schwache Signale ist vermindert. Die zukünftige Navigations-Message mit höherer Genauigkeit ist allein auf dem CM-Code aufmoduliert, während der CL-Code datenfrei ist. Dadurch wird das Signal-zu-Rausch-Verhältnis beim Verfolgen des CL-Signals wesentlich verbessert. So wird auch trotz nominell geringerer Signalstärke als bei L1 C/A (–160 dBW bei L2C im Vergleich zu –158,5 dBW für C/A Code) eine stabileres Tracking erreicht.

Die Analysen von Leandro et al. (2008) zeigen, dass die Vorteile des neuen Codes erst bei Elevationen unter 10° deutlich werden. Es zeigt sich eine Verbesserung im RMS der Code-Residuen auf 1,5 m. Die Phasenmessungen, sofern die Phase durchgängig getrackt wurde, zeigen kaum Verbesserungen. Es muss noch gezeigt werden, inwiefern bei schwierigen Empfangsbedingungen, mit Abschattungen unter Bäumen oder in Straßenschluchten die neuen Signaleigenschaften auch bei höheren Elevationen und in den Phasenmessungen Vorteile bringen. Generell, auch unabhängig von der Genauigkeit, ist die neue Signalstruktur von modernisiertem GPS und GALILEO wesentlich robuster und damit effektiver als die der bisherigen Signale auf L1 und L2.

8 Ausblick

Die Entwicklung der letzten zwei Jahre hat gezeigt, dass es zwar Verzögerungen in der Programmumsetzung bei allen GNSS gibt, dass aber die generelle Zielrichtung von verbesserten Signalen auf mindestens drei Frequenzen, der Augmentierung mit DGPS- oder PDGPS-Systemen im Weltraum oder bodengestützt, sicher weitergeht. Die kommerzielle Nutzung der Satellitennavigation und die wirtschaftlichen Vorteile eines einheitlichen Systems für Navigation, Positionierung und Zeitübertragung in einem einheitlichen globalen Referenzsystem sind nicht mehr zu ersetzen oder zu ignorieren.

Bei der Modernisierung und dem Neuaufbau gibt es unterschiedliche Ansätze. Die globalen GNSS werden sehr wahrscheinlich aus den oben angegebenen ökonomischen Gründen kompatibel und interoperabel werden. Dazu sind intelligent konzipierte regionale Systeme in Japan, China und Indien im Aufbau, die zu geringeren Kosten und unter Nutzung der globalen NSS eine sehr gute Verfügbarkeit und Genauigkeit erreichen werden und multifunktional eingesetzt werden können.

Der wesentliche Vorteil der Verfügbarkeit von mehreren GNSS und der kombinierten Nutzung sind die verbesserten Sichtbarkeitsbedingungen mit höherer Anzahl von gleichzeitig verwendbaren Satelliten auch unter Abschattungsbedingungen, siehe z. B. Müller et al. (2009).

Die Homogenisierung und Standardisierung wird im Hinblick auf die Datenformate, speziell für Echtzeitdaten, die Standardisierung der Integritätsinformation mit deren Generierung und Verarbeitung sowie mit der Standardisierung der regionalen Augmentierungssysteme noch eine größere Strecke vor sich haben, aber die wirtschaftlichen Vorteile lassen auch hier eine Konvergenz erwarten und erhoffen.

Auch für die Wissenschaft wird die Modernisierung weitere Vorteile bei Anwendungen zur instantanen hochgenauen Positionierung, der Wettervorhersage in Troposphäre und Ionosphäre bringen. Die GNSS werden in allen Bereichen der terrestrischen und erdnahen Positionierung und Navigation – auch von anderen Erdsatelliten und Raumsonden – die wesentliche Rolle spielen.

Literatur

- Al-Fanek, O., Skone S., Lachapelle G., Fenton P.: Evaluation of L2C Observations and Limitations. In: Proceedings of ION GNSS 2007, the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Fort Worth, Texas, September 25–28, 2007, pp. 2510–2518, 2007.
- Becker, M.: GPS Modernisierung und ihre Auswirkungen. In: GPS und GALILEO – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen, Schriftenreihe des DVW, Band 49, Wißner-Verlag, 2006, S. 3–16, ISBN 3-89639-521-1, 2006.
- Bierendonck, A.J.: GNSS User Assessment of GPS/GALILEO Interoperability. Präs. 45. CGSIC Meeting, September 2005, Salt Lake City, 2005.

- Enge, P.: Recent Progress on Aviation Integrity. In: Proc. ION GNSS 21st Internat. Technical Meeting of the Satellite Division, Sept. 16.–19., 2008, Savannah, USA, S. 1089–1108, 2008.
- Gurtner, W., Estey L.: RINEX V3.00, Draft, AIUB, Univ. of Berne, Mai 2005, www.aiub.unibe.ch/download/rinex/rinex300.doc, 2005.
- Huang, Y.S., Tsai M.-L.: The Impact of Compass/Beidou-2 on Future GNSS: A Perspective From Asia, National Cheng-Kung University, Taiwan. In: ION GNSS 2008, Savannah, GE, USA, 2008.
- Humphreys, T., Young L., Pany T.: Considerations for Future IGS Receivers. 2008 IGS Workshop, Miami, FL, USA, www.ngs.noaa.gov/IGSWorkshop2008/docs/recDev-positionpaper.pdf, 2008.
- Lainez, M.D., Romay M.M.: LCNSS: A New Approach to the Navigation Satellite Systems. International Symposium on GPS/GNSS 2008. Tokyo, Nov. 11.–14. 2008. <http://gnss2008.jp/>, 2008.
- Leandro, R.F., Langley R.B., Santos M.C., Sůkeová L., Thatchineswaran Thirumurthi: The GPS L2C Signal-A Preliminary Analysis of Data Quality, GPS World, Oct 1, 2008.
- Madden, D.: GPS Program Update to ION GNSS 2008, Proc. ION GNSS 21st Internat. Technical Meeting of the Satellite Division, Sept. 16.–19., 2008, Savannah, USA, S. 412–430, 2008.
- Müller, K., Becker M., Leinen S.: Realistic prediction of accuracy in urban environments with a GNSS simulation tool, AVN 2009, accepted.
- NAVCEN 2009, <http://navcen.uscg.gov/pubs>.
- Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, IS-GPS-200, Revision D, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, California, December 2004, with IRN-200D-001 update, March 2006.
- Revnivykh, S.: GLONASS-Status and Progress. Civil GPS User Interface Committee Meeting, 16.09.2008, Savannah, GA, USA.
- Rho, H., Langley R.B.: Evaluation of the New Civil GPS L5 Signal. ION GNSS 2008, Savannah, GE, USA.
- Rollo, R.: Navigation nugget: New chip-scale atomic clock plus GPS receiver transforms navigation. The Department of the Navy Information Technology magazine, CHIPS, April-June, 2007, www.chips.navy.mil.
- Schoenemann, E., Springer T.A., 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: Proc. Scientific and Fundamental Aspects of the GALILEO Programme, Toulouse, France, October 2007.
- Simsky, A., Sleewaegen J.-M., Hollreiser M., Crisci M.: Performance assessment of GALILEO ranging signals transmitted by gsb-v2 satellites. In: Proc. ION GNSS, September 2006, USA.
- Sůkeová, L., Santos M.C., Langley R.B., Leandro R.F., Nnani O., Nievinski F.G.: GPS L2C Signal Quality Analysis. In: Proceedings of ION 63rd Annual Meeting, Cambridge, Massachusetts, April 23–25, 2007, S. 232–241, 2007.
- Weber, G., Mervart L., Lukes Z., Rocken C.: Real-time Clock and Orbit Corrections for Improved Point Positioning via NTRIP. Proceedings of the ION GNSS 2007, Fort Worth, September 2007, 2007.
- Wu, F., Kubo N., Yasuda A.: Performance analysis of GPS augmentation using Japanese Quasi-Zenith Satellite System, Earth Planets Space, Vol. 56 (No. 1), S. 25–37, 2004.

Anschrift des Autors

Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker
 Institut für Physikalische Geodäsie, TU Darmstadt
 Petersenstraße 13
 64287 Darmstadt
becker@ipg.tu-darmstadt.de