

Von GPS zu Galileo – Die Weiterentwicklung der Satelliten-Navigation

Teil 1: Navigationstechnische Grundlagen, GPS und GLONASS

Am 28. Dezember 2005 wurde der erste Galileo-Satellit namens „GIOVE-A“ ins All gebracht: Damit ist Europa zum ersten Mal aktiv im Geschäft mit der Satelliten-Navigation dabei und wird unabhängig vom amerikanischen GPS. Im Folgenden die Schritte dieser technischen Evolution, Teil 2 des Beitrages im nächsten Heft wird dann speziell auf die technischen Parameter und Anwendungsvarianten von Galileo eingehen.

Von Prof. Jean-Marie Zogg

Satelliten-Navigationssysteme gehören schon bald zur Standardausrüstung jedes Mittelklasse-Pkws, und auch den Fußgänger, Wanderer oder Radfahrer unterstützen mittlerweile portable Navigationsgeräte. Sie alle basieren derzeit auf dem amerikanischen GPS (Global Positioning System). Aber das soll sich ändern: Europäer und Russen wollen am Geschäft teilhaben. So ist es wahrscheinlich, dass in fünf bis sechs Jahren drei unabhängige Navigationssysteme zur Verfügung stehen. Die USA stellen dann weiterhin (ein demnächst modernisiertes) GPS, die GUS ein dann funktionierendes GLONASS und die EU

das Galileo zur Verfügung. Mit drei Systemen würden wir nicht nur auf der Straße die Haustüre genauer finden, sondern, was noch wichtiger ist, wir hätten immer noch zwei funktionierende Alternativen, sollte ein System ausfallen oder gestört werden. Und auch die Luftfahrt profitiert: Präzise Landeanflüge werden somit möglich.

Prinzip der Satelliten-Navigation und der Ortung

Mit Satelliten-Navigation (zur Zeit funktioniert nur das amerikanische Navigationssystem GPS vollumfänglich) können geographische Koordinaten, Höhe und Zeit bestimmt werden. Bei handelsüblichen GPS-Navigationsempfängern betragen die Abweichungen bei der Bestimmung von Längen- und Breiten-Koordinaten ca. 13 m, bei der Höhe ca. 20 m und bei der Zeit ca. 60 ns. Diese Angaben sind statistische Werte:

Bei 95 % der Messungen sind die erzielten Resultate besser. Neben den Größen „Länge, Breite, Höhe und Zeit“ können natürlich Geschwindigkeit, Kurs, zurückgelegte Strecke, verbleibende Distanz zu einem Ziel usw. in einem Navigationssystem aus den Basisdaten berechnet werden.

Alle Satelliten-Navigationssysteme (existierende wie auch zukünftige) wenden die gleiche Technik an, um Koordinaten zu bestimmen: Satelliten mit bekannter Position senden regelmäßig Zeitsignale aus. Anhand der gemessenen Laufzeit (Lichtgeschwindigkeit $c = 300\,000\text{ km/s}$) wird die Entfernung des Empfängers vom Satelliten berechnet. Um die vier Parameter „Länge, Breite, Höhe und Zeit“ eindeutig zu bestimmen, muss man die Zeitsignale von vier Satelliten nutzen (Bild 1 zeigt das Prinzip vereinfacht mit zwei Sendern – bzw. Satelliten).

Da die Empfänger-„Borduhr“ nicht absolut genau mit der Zeit des Senders übereinstimmt, resultiert bei der Distanzbestimmung eine Abweichung vom Realwert. Die fehlerbehaftete Distanz wird in der Navigation als „Pseudorange“ bezeichnet. Ein Zeitbasisfehler von z.B. $1\ \mu\text{s}$ generiert einen Distanzfehler von 300 m. Der Einbau einer exakten Atomuhr in Autos oder tragbare Navigationssysteme würde aber das Finanzbudget und jedes Gehäuse sprengen. Man löst das Problem, indem man zwei untereinander synchronisierte Zeitsender nutzt. Der Abstand A des zweiten Senders (Satelliten) ist ja bekannt. Durch Messung beider Laufzeiten kann nun die Distanz D , trotz der ungenauen Uhr am Erdboden, exakt bestimmt werden (siehe Formel in Bild 1).

Um die Position (und die Zeit) auf einer Geraden (eine Gerade hat eine Ausbreitung in eine Dimension) exakt

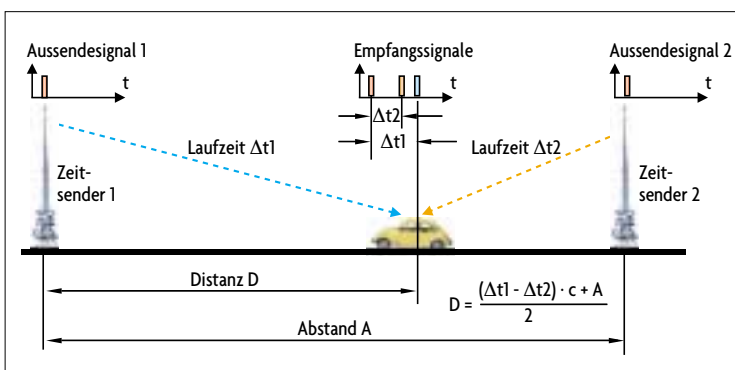


Bild 1. Mit zwei Sendern (Satelliten) kann die exakte Position am Boden, trotz Zeitfehler, bestimmt werden.



I Bild 2. Zeitbestimmung, Vermessung, Straßennavigation und Outdoor sind die wichtigsten Einsatzbereiche für Navigations- und Ortungsgeräte.

(Bilder: Truetime.com, Leica.ch und Garmin.de)

zu bestimmen, braucht es demnach zwei Zeitsender. Daraus lässt sich folgende Erkenntnis ableiten: Werden unsynchronisierte Empfänger-Uhren verwendet, muss die Anzahl der „Zeitsender“ um 1 größer sein als die Anzahl der unbekannt Dimensionen. In den drei Raumdimensionen benötigt man also vier dieser Zeitsender (in diesem Fall: Satelliten).

Anwendung findet die Satelliten-Navigation überall dort, wo geographische Koordinaten und die Zeit exakt ermittelt werden müssen: zur präzisen Zeitbestimmung, zur Vermessung und Landkartenherstellung, zur Navigation im Straßenverkehr, in der Luft- und Seefahrt sowie im Freizeitbereich (Bild 2).

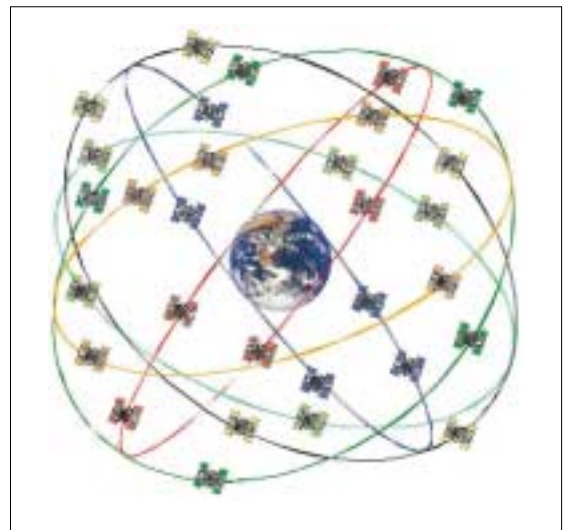
■ Status quo der Satelliten-Navigation: GPS

Das Globale Positionierungs-System GPS (die vollständige Bezeichnung lautet: NAVigation System with Timing And Ranging Global Positioning System, NAVSTAR-GPS) wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium (US Department of Defense, DoD) entwickelt und kann von zivilen und militärischen Anwendern genutzt werden. Das zivile Signal (SPS: Standard Positioning Service) ist von der Allgemeinheit frei nutzbar, während das militärische Signal (PPS:

Precise Positioning Service) nur von autorisierten Stellen (US-Militär) genutzt werden darf. Der erste Satellit wurde am 22. Februar 1978 in seine Umlaufbahn gebracht. Im Januar 2006 umkreisten 29 aktive Satelliten [1] in einer Höhe von 20 180 km auf sechs verschiedenen Bahnen die Erde. Die Bahnen (Bild 3) sind um 55° zum Äquator geneigt, womit von jedem Punkt der Erde eine Funkverbindung zu mindestens vier Satelliten gewährleistet wird. Jeder Satellit umkreist die Erde ein Mal in 11 h und 58 min und hat vier Atomuhren an Bord.

Jeder Satellit sendet auf einer Frequenz von 1575,42 MHz und 1227,6 MHz seine genau bekannte Position und seine exakte Bordzeit zur Erde. Die Signale werden durch pseudozufälliges Rauschen (PRN = pseudorandom noise) aufgespreizt [2]. Der Betreiber (DoD) nimmt das Recht in Anspruch, während Krisenzeiten im Kriegsgebiet allenfalls eine künstliche Verschlechterung einzuschalten. Dies erhöht die Abhängigkeit der GPS-Nutzer in aller Welt vom politischen Willen der USA.

Für das GPS-System existieren so genannte GPS-Jammer (Jammer = engl. für Störsender). Ein Jammer mit einer Ausgangsleistung von 4 W kann GPS-Empfänger im Umkreis von 150 bis 200 km stören (Bild 4). Das US-Militär kann GPS-Jammer orten, sobald diese eingeschaltet werden. Die GPS-Störsender, die der Irak eingesetzt hatte, um den US-Streitkräften die Orientierung zu erschweren, haben sich laut US-Militärkreisen nicht als



I Bild 3. Auf sechs verschiedenen Bahnen umkreisen die GPS-Satelliten den Erdball (Stand: Januar 2006).

echtes Hindernis erwiesen, denn sie konnten mit dem Einschalten geortet und letztlich zerstört werden.

Um die Präzision der Koordinatenbestimmung zu erhöhen, gibt es das Differential-GPS (DGPS): An einem bekannten und genau vermessenen Punkt befindet sich eine GPS-Referenzstation.



Bild 4. Ein GPS-Störsender mit einer Ausgangsleistung von 4 W kann im Umkreis von 200 km stören [3].

renz-Station, die ihre „Koordinaten“ mit Hilfe von mindestens vier Satelliten ermittelt. Da sie aber ihre exakte Position auf der Erde kennt, kann sie die Abweichung der über die Satellitensignale momentan gemessenen Position bzw. die Pseudorange der einzelnen Satelliten berechnen. Diese Abweichungen gelten ebenfalls für alle im Bereich bis zu 200 km vorhandenen GPS-Empfänger um die GPS-Referenz-Station, sie werden als „Korrektursignale“ per Funk an DGPS-Empfänger in diesem Umkreis verschickt, so dass diese ihre Position bis auf wenige Zentimeter genau berechnen können. Die Pseudorange-Differenzen können somit zur Korrektur der von weiteren GPS-Empfängern gemessenen Positionen genutzt werden. Die Korrektursignale werden üblicherweise mittels Funk im UKW-Bereich oder für spezielle Anwendungen mittels (Funk-)Telefonverbindung an die DGPS-Empfänger übermittelt. Da sich die Fehler der einzelnen GPS-Satelliten nur langsam ändern, ist diese Übertragung nicht zeitkritisch. Für einfache DGPS-Anwendungen reicht eine Korrektur alle 3 s aus, für hochgenaue DGPS-Korrekturen sind sehr viel höhere Raten im Bereich von 0,1 s nötig.

renz-Station, die ihre „Koordinaten“ mit Hilfe von mindestens vier Satelliten ermittelt. Da sie aber ihre exakte Position auf der Erde kennt, kann sie die Abweichung der über die Satellitensignale momentan gemessenen Position bzw. die Pseudorange der einzelnen Satelliten berechnen. Diese Abweichungen gelten ebenfalls für alle im Bereich bis zu 200 km vorhandenen GPS-Empfänger um die GPS-Referenz-Station, sie werden als „Korrektursignale“ per Funk an DGPS-Empfänger in diesem Umkreis verschickt, so dass diese ihre Position bis auf wenige Zentimeter genau berechnen können. Die Pseudorange-Differenzen können somit zur Korrektur der von weiteren GPS-Empfängern gemessenen Positionen genutzt werden. Die Korrektursignale werden üblicherweise mittels Funk im UKW-Bereich oder für spezielle Anwendungen mittels (Funk-)Telefonverbindung an die DGPS-Empfänger übermittelt. Da sich die Fehler der einzelnen GPS-Satelliten nur langsam ändern, ist diese Übertragung nicht zeitkritisch. Für einfache DGPS-Anwendungen reicht eine Korrektur alle 3 s aus, für hochgenaue DGPS-Korrekturen sind sehr viel höhere Raten im Bereich von 0,1 s nötig.

■ Status quo der Satelliten-Navigation: das russische System GLONASS

GLONASS ist die Kurzbezeichnung für ein Satelliten-Navigationssystem, das vom russischen Verteidigungsministerium betrieben wird. Die Bezeichnung GLONASS steht für GLObales NAVigations-Satelliten-System. Gestartet wurde das Programm von der früheren UdSSR. Betrieben wird es heute von der GUS (Gemeinschaft un-

abhängiger Staaten). Die ersten drei Testsatelliten wurden am 12. Oktober 1982 in ihre Umlaufbahn gebracht. Die wichtigsten Daten sind: 24 geplante Satelliten (21 Standard- + drei Reserve-Satelliten). Diese Anzahl wurde allerdings nie erreicht; im Januar 2006 waren zwölf Satelliten funktionsfähig [4]. Die relativ kurze Lebensdauer einzelner Satelliten von ca. drei bis vier Jahren bremsen den Vollausbau. Es gibt drei Bahnebenen mit 64,8° Neigung gegen den Äquator (dies ist die höchste Neigung aller Navigationssysteme und ermöglicht eine Verbesserung des Empfangs in Polnähe), ihre Höhe ist 19 100 km. Die Umlaufzeit beträgt 11 h 15,8 min. Jeder Satellit sendet auf zwei Frequenzen zwei

liten senden auf der L1-Frequenz von GPS, aus ca. 36 000 km Höhe über dem Äquator, ihre Signale in Richtung Nutzungsgebiet. Die drei wichtigsten Funktionen sind:

Zunächst die Erhöhung der Ortungsgenauigkeit durch Korrekturdaten: WAAS und EGNOS stellen Differentialkorrekturdaten (ähnlich DGPS) zur Verfügung, mit denen die Positionierungsgenauigkeit verbessert wird. In erster Linie geht es darum, den Ionosphärenfehler zu korrigieren, der durch Signalverzögerungen in der Ionosphäre entsteht. Der Ionosphärenfehler schwankt mit der Tageszeit und ist regional unterschiedlich. Zusätzlich zu den Ionosphärenwerten werden von den Erweiterungssystemen Korrektur-

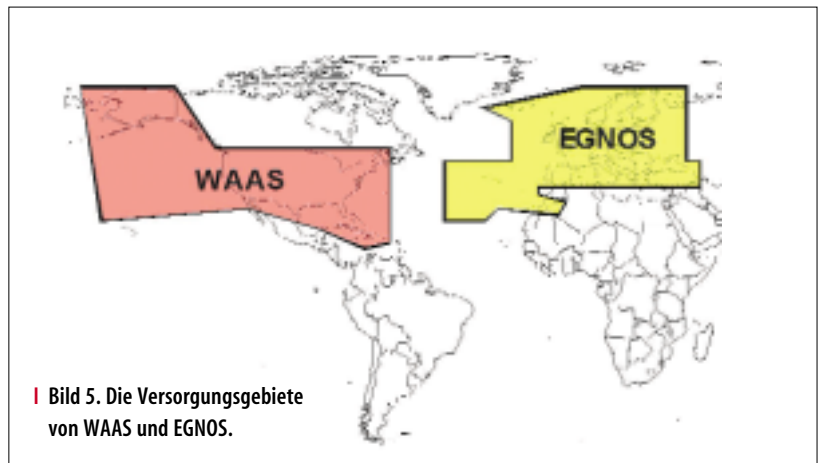


Bild 5. Die Versorgungsgebiete von WAAS und EGNOS.

verschiedene Codes (C/A und P) aus. Alle Satelliten senden mit gleichem Code (PRN), aber auf verschiedenen Frequenzen in der Nähe von 1602 MHz und von 1246 MHz. Diese Frequenzuteilung soll sich im Laufe der nächsten Jahre ändern.

■ Erweiterungssysteme: WAAS und EGNOS

WAAS („Wide Area Augmentation System“ für den amerikanischen Raum) und EGNOS („European Geostationary Navigation Overlay Service“ für den europäischen Raum) erweitern GPS und GLONASS und ab dem Jahre 2010 Galileo mit neuen Funktionen. Mit Hilfe von mehreren geostationären Satelliten (GEO-Satelliten) werden vor allem Korrektur- und Integritätsdaten zu Navigationsempfängern ausgesendet. Die GEO-Satel-

Informationen über den Positionsstandort der Satelliten (Ephemeriden) und die Zeitmessung übermittelt.

Aber auch eine Erhöhung der Integrität und Sicherheit wird geboten: WAAS und EGNOS überwachen jeden Navigations-Satelliten und können mit einer kurzen Vorwarnzeit von 6 s einen Fehler oder Ausfall des Satelliten an den Nutzer melden. Diese Ja/Nein-Information wird nur übertragen, wenn die Qualität der empfangenen Signale bestimmte Grenzwerte unterschritten hat.

Letztlich ergibt sich auch eine Erhöhung der Verfügbarkeit durch Aussenden von Navigationsinformationen, denn die Erweiterungs-GEO-Satelliten senden Signale aus, welche den GPS-Signalen ähneln. Navigations-Empfänger können diese Signale zur Ortung auswerten (Bild 5 zeigt die jeweiligen Versorgungsgebiete). Wäh-

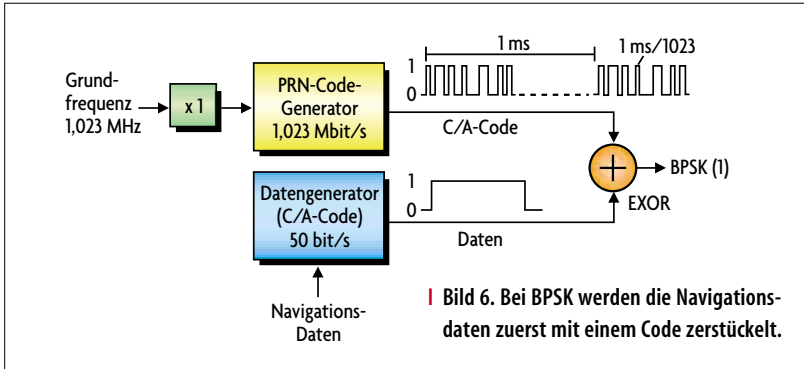


Bild 6. Bei BPSK werden die Navigationsdaten zuerst mit einem Code zerstückelt.

ren Stufe moduliert [5]. Die Modulations-Frequenz ist immer ein Vielfaches der Grundfrequenz 1,023 MHz. Die Modulations-Eigenschaften werden in einer Kurzform angegeben; so bedeutet z.B. BOC(10,5), dass die Modulationsfrequenz $10 \times 1,023$ MHz und die Taktrate des Codes $5 \times 1,023$ Mbit/s betragen (Bild 7).

Dank BOC wird das Signal besser über die zur Verfügung stehende Bandbreite verteilt, und der Einfluss gegenüber Signalreflexionen (Multipath) beim Empfang des Navigationssignals wird im Vergleich zu BPSK verringert. Werden BPSK(1) und BOC(1,1) gleichzeitig eingesetzt, ist die gegenseitige Beeinflussung gering, da die Frequenz-Maxima der Leistungsdichte auseinander liegen (Bild 8).

Die Modernisierung von GPS

Seit Inbetriebnahme des Systems im Jahre 1978 senden GPS-Satelliten drei Signale zur Erde aus:

rend WAAS für die USA konzipiert ist und von der dortigen Bundesluftfahrtverwaltung (FAA, Federal Aviation Agency) betrieben wird, steht EGNOS unter der Leitung der ESA (European Space Agency), der Europäischen Union und Eurocontrol. Japan und Indien planen eigene Erweiterungssysteme.

Obwohl alle satellitengestützten Erweiterungssysteme (Satellite Based Augmentation Systems, SBAS) größere Regionen umfassen, muss sichergestellt werden, dass sie miteinander verträglich (interoperabel) sind. Die Kompatibilität ist durch die Verwendung des Standards RTCA DO-229C gewährleistet.

Zukunft der Satelliten-Navigation: das neue Modulationsverfahren BOC

Da Galileo gegen Ende dieser Dekade in Betrieb geht, planen die USA und die Gemeinschaft unabhängiger Staaten GUS, ihre GPS- bzw. GLONASS-„Flotte“ aufzurüsten. Wenn dem so ist, werden zu Beginn des nächsten Jahrzehnts drei gleichzeitig funktionierende Navigationssysteme komplett gleichzeitig nutzbar sein.

Damit hierfür alle Satelliten auf der gleichen Frequenz senden können, werden bei GPS die Navigationsdaten mit einem speziellen Code zerstückelt und aufgespreizt (moduliert). Dieser Code besteht aus einer scheinbar zufälligen Folge (Pseudo Random Noise Code, PRN) von 1023 Nullen und Einsen. Bei GPS wird dieser Code auch C/A-Code genannt. Das Code-Muster mit einer Länge von 1 ms wird ständig wiederholt und dient dem Empfänger zur Identifikation und zur Laufzeitmessung. Wegen der einmaligen Struktur des Musters weiß der Empfänger, von welchem Satelliten dieses Signal stammt.

Die Taktrate des Zerstückelungs-Codes beträgt 1,023 Mbit/s, wobei mit einer EXOR-Konfiguration gearbeitet wird (Bild 6). Das Ergebnis wird BPSK(1) genannt. Dies bedeutet Binary Phase Shift Keying, zerstückelt mit einem Code von $1 \times 1,023$ Mbit/s. Grundsätzlich werden alle Satellitensignale von der Grundfrequenz 1,023 MHz abgeleitet.

Bei GPS und Galileo soll in Zukunft ein neues Modulationsverfahren zum Einsatz kommen: die Binary Offset Carrier Modulation BOC. Bei BOC wird das BPSK-Signal in einer weite-

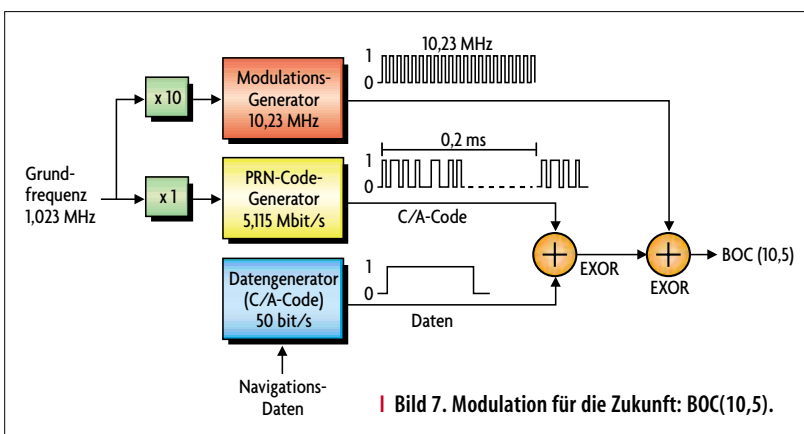


Bild 7. Modulation für die Zukunft: BOC(10,5).

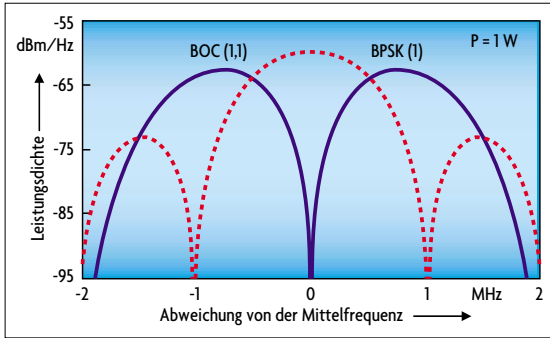


Bild 8. Bei BPSK(1) und BOC(1,1) liegen die Signalmaxima auseinander (Sendeleistung ist normiert auf 1 W pro Signal).

- ▶ Auf der Frequenz von 1575,42 MHz (L1-Frequenz): ein Signal für zivile (SPS-Dienst mit dem C/A-Signal, BPSK(1)) und eines für militärische Anwendungen (PPS-Dienst mit dem P(Y)-Signal, BPSK(10)).
- ▶ Auf der Frequenz von 1227,60 MHz (L2-Frequenz, BPSK(10)): das zweite P(Y)-Signal für militärische Anwendungen.

Das Verteidigungsministerium DoD plant schrittweise Verbesserungen der Signalstruktur (**Bild 9**). Für zivile Anwender wäre die Einführung einer zweiten und dritten Frequenz wichtig: Werden mehrere Frequenzen zur Positionsbestimmung verwendet, kann der Einfluss der Ionosphäre auf die Laufzeit kompensiert bzw. eliminiert werden. Die Kompensierung ist möglich, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Ionosphäre frequenzabhängig ist. Die GPS-Modernisierung wird neben den zwei neuen Signalen auch eine Steigerung der Signalleistung für zivile Nutzer sowie erweiterte Leistungsmerkmale und neue Signale für die militärische Nutzung mit sich bringen.

Folgenden Zeitplan möchten die Betreiber von GPS einhalten: Am 25. September 2005 wurde der erste von

acht neuen Satelliten des Typs IIR-M (Block 2, Replenishment and Military) in den Orbit gebracht. Am 16. Dezember 2005 war dieser Satellit sendebereit. Der Start der restlichen sieben Satelliten ist ab Frühjahr 2006 geplant. Die IIR-M-Satelliten senden zusätzliche Signale aus, z.B.:

- ▶ Ein neues, ziviles Signal auf der Frequenz von 1227,60 MHz, das so genannte L2C-Signal.
- ▶ Weitere militärische Signale auf 1575,42 MHz und 1227,60 MHz: die M-Signale. Für diese M-Signale wird die BOC(10,5)-Modulation verwendet.

Gegen Ende dieses Jahrzehnts (optimistische Quellen nennen das Jahr 2007) ist eine neue Satelliten-Generation geplant. Diese neue Reihe wird die Bezeichnung IIF (Block 2, Follow-On) und III (Block 3) haben. Die wichtigsten Merkmale dieser Satelliten werden sein:

- ▶ Neues ziviles Signal auf der Frequenz von 1176,45 MHz (L5-Frequenz). Dieses Signal soll robuster sein als die vorgängigen zivilen Signale und kann für kritische Anflüge in der Luftfahrt verwendet werden.
- ▶ Erhöhung der Signalstärke der M-Signale (M+) durch den Einsatz von konzentrierenden Beam-Antennen.
- ▶ Verbesserung der C/A-Signalstruktur der zivilen L1-Frequenz. Das neue Signal soll die Bezeichnung L1C erhalten.

Neben der Verbesserung des Raumsegmentes werden auch die Bodenstationen erneuert; Mitte des nächsten Jahrzehnts sollte die umfassende Instandsetzung abgeschlossen sein. Die neuen Signale stehen dem Anwender dann komplett zur Verfügung.

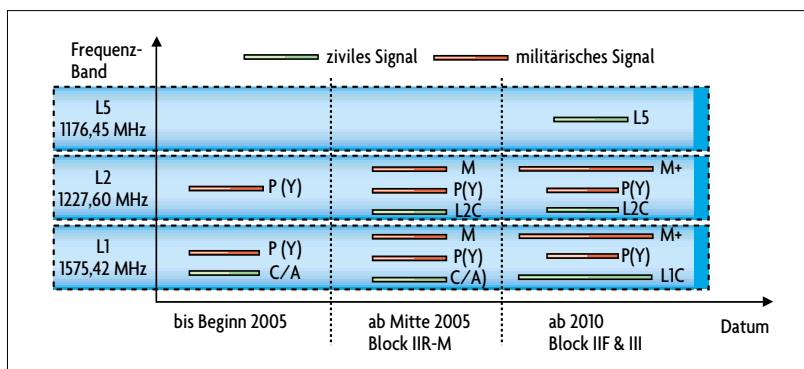


Bild 9. Das Frequenzangebot wird durch die Modernisierung von GPS erhöht.

Auch GLONASS wird verbessert: Das System umfasst im Vollausbau 24 funktionstüchtige Satelliten. Wegen der politischen Umwälzungen in der Russischen Region und aufgrund vieler Ausfälle waren am 10. Januar 2006 noch zwölf Satelliten funktionsfähig [6]. Die GUS plant, ihr Navigationssystem bis Ende 2008 wieder in Stand zu setzen. Drei Erneuerungssatelliten wurden am 25. Dezember 2005 erfolgreich in ihre Umlaufbahn gebracht und sollen bis März 2006 betriebsbereit sein. Zwei dieser drei Satelliten sind von der M-Serie. Diese neue Serie soll eine Lebensdauer von ca. sieben bis acht Jahren haben. Die neuen GLONASS-M-Satelliten senden zwei zivile Signale aus. Ab dem Jahre 2007 sollen Satelliten der K-Serie ins All gebracht werden; diese werden eine Lebensdauer von zehn bis zwölf Jahren haben und drei zivile Signale ausstrahlen. ha

Links und Literatur

- [1] www.navcen.uscg.gov/ftp/gps/status.txt
- [2] Zogg, J.-M.: Telemetrie mit GSM/SMS und GPS-Einführung. Franzis Verlag GmbH, Poing, ISBN: 3-7723-5776-8.
- [3] www.armada.ch/03-3/article-full.cfm
- [4] www.glonass-center.ru/nagu.txt
- [5] Journal of the Institute of Navigation, 2002, Vol.48, No. 4, Seite 227 bis 246, Autor: John W. Betz.
- [6] www.glonass-center.ru/nagu.txt



Prof. Dipl.-Ing. FH Jean-Marie Zogg

ist Professor für Elektronik, Mobile Computing und Elektrotechnik an der Fachhochschule HTW Chur (Hochschule für Technik und Wirtschaft Chur, Schweiz), an der er sich vertieft mit den Gebieten der Satelliten-Kommunikation auseinandergesetzt hat. Zu diesen Themen hat er in namhaften Fachzeitschriften publiziert, außerdem verfasste er ein Fachbuch zum Thema „Telemetrie mit GSM/SMS und GPS-Einführung“.
jean-marie.zogg@fh-htwchur.ch