

Die Modernisierung des zivilen GPS

Genauigkeit wird weiter gesteigert: bessere Technik, neue Satelliten

Vielleicht durch den Druck, der durch die neu zu installierenden Navigationssysteme aus Europa, Russland und dem Fernen Osten entstanden ist, haben die USA eine Überarbeitung des GPS beschlossen und bereits damit begonnen. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Neuerungen, bezogen auf die zivilen Komponenten des Systems.

Von Jean-Marie Zogg

■ Aktueller Stand von GPS

Das GPS startete seinen ersten Block-I-Satelliten im Februar 1978. Seither sind viele Optimierungen und Verbesserungen erfolgt, derzeit sind 31 Satelliten voll einsatzfähig. Die Entwicklungsschritte der letzten beiden Jahre waren:

► Juli 2007: Die USA und die EU beschließen, ein gleichartiges Signal bei GPS und Galileo zu verwenden. Für GPS wird es das Signal L1C und bei Galileo L1F. Dieses Signal soll MBOC-

codiert sein und auf der gleichen Frequenz ausgestrahlt werden. Es wird von GPS ab Generation GPS IIIA zur Verfügung stehen.

► März 2009: Der erste GPS-Satellit des Typs IIR-M (genaue Bezeichnung: GPS IIR-20(M)) welcher versuchsweise das zivile Signal L5 sendet, wird erfolgreich in den Orbit gebracht [4]; insgesamt gehen acht Satelliten dieses Typs derzeit in Betrieb. Die temporäre Aufschaltung von L5 hat den Zweck, die von der ITU (International Telecommunication Union) zugewiesenen



Start des Satelliten GPS IIR-20(M). (Quelle: United Launch Alliance)

Das „Global Positioning System“ GPS (Grundlagen siehe [1]) ist zur Zeit die einzige weltweit funktionierende satellitengestützte Navigationshilfe; sie soll nun Konkurrenz erhalten: Die GUS-Staaten wollen ihren GLONASS wieder instand setzen, Europa ist dabei, das eigene System Galileo aufzubauen, China will das Navigationssystem Compass/Beidou lancieren und Japan entwickelt QZSS. Vor lauter neuen Systemen wird die Modernisierung von GPS oft übersehen.

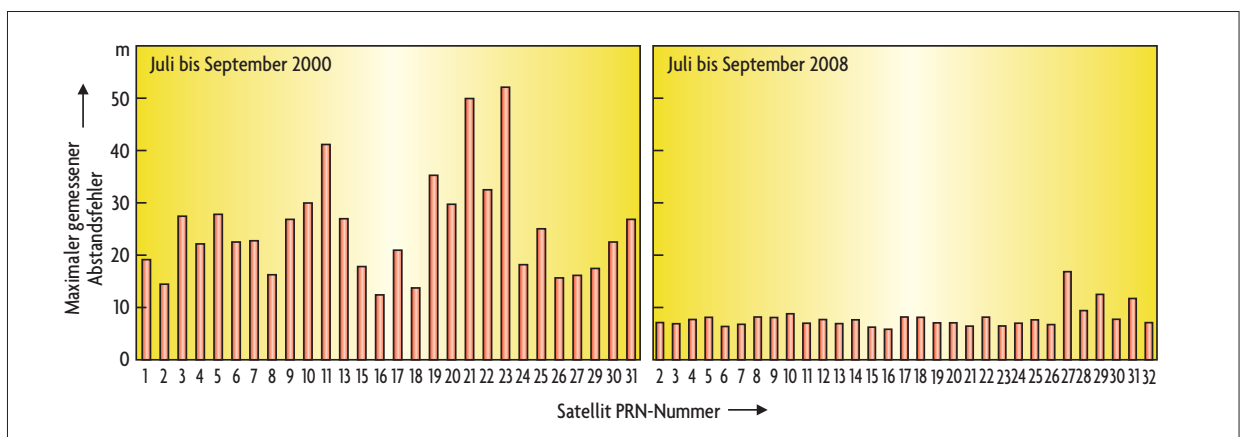


Bild 1. Maximale Fehler des gemessenen Abstands „Satellit zu Beobachter“ pro Satellit.

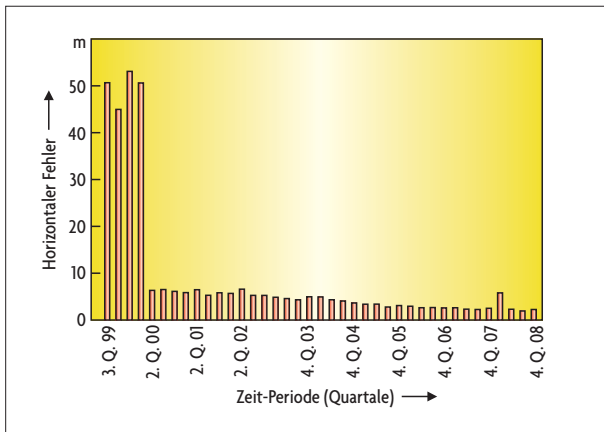


Bild 2. Entwicklung des Positionsfehlers (nur horizontal) von 1999 bis 2008 (95%-Wert: 95 % aller Messungen sind genauer).

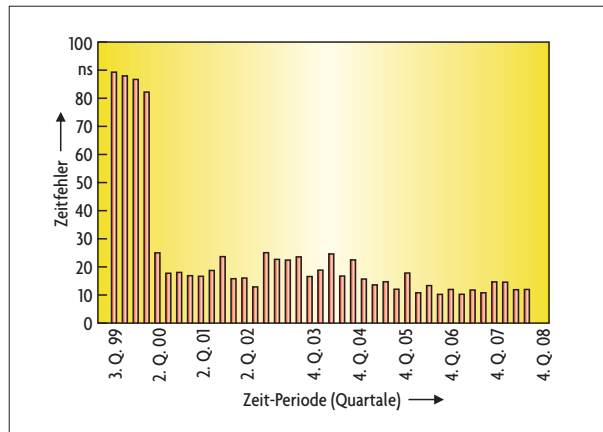


Bild 3. Entwicklung des Zeitfehlers aller Messungen von 1999 bis 2008 (95%-Wert).

Frequenzen noch vor dem 26. August 2009 gesichert zu haben.

Dass die verwendete Satelliten- und Empfängertechnik im Laufe der Entwicklung immer besser wurde, beweist **Bild 1** [6]. Es zeigt den maximalen Fehler des gemessenen Abstandes R (Satellit zu Beobachter, Range Error) pro Satellit. Vom Jahre 2000 bis zum Jahre 2008 sank der Fehler ca. um den Faktor 3, z.B. durch genauer bekannte Satellitenpositionen, präzisere Atomuhren usw. Übrigens: Die zur Positionsbestimmung nötige Navigationsgleichung kann durch Messung des Abstandes zu vier Satelliten gelöst werden.

Die US-Luftfahrtbehörde FAA (Federal Aviation Administration) misst mit weltweit verteilten Messempfängern quartalsweise die Genauigkeit von GPS und publiziert sie [7]. **Bild 2** zeigt für den Zeitraum vom 3. Quartal des Jahres 1999 bis zum 4. Quartal des Jahres 2008 den Verlauf von Positionsfehlern, **Bild 3** den Verlauf des Zeitfehlers. 95 % aller Messungen waren genauer als die gezeigten Werte. Die markante Abnahme der Fehler

während des Jahres 2000 ist begründet mit der Abschaltung der künstlichen Verschlechterung SA (Selective Availability) am 2. Mai 2000. Von Juli bis September 2000 zeigten 95 % aller Messwerte für die Horizontale schon einen Fehler unter 6,35 m, von Juli bis September 2008 gar unter 1,995 m.

■ Aktueller technischer Stand und Bedeutung einer zweiten Frequenz

Im März 2009 waren von den 57 ins All gebrachten Satelliten noch 31 in Betrieb [8]. Bei der Inbetriebnahme des Systems im Jahre 1978 sendeten die GPS-Satelliten ein Signal für zivile Anwendungen (SPS, Standard Positioning Service) zur Erde aus: Auf der Frequenz von 1575,42 MHz (L1-Frequenzband) das C/A-Signal (Coarse acquisition), genannt L1-C/A-Signal. Das L1-C/A-Signal wird mit BPSK (Binary Phase Shift Keying) moduliert. Seit 2005 senden die neuen Satelliten das zweite zivile Signal L2C mit der Frequenz 1227,60 MHz.

Im Folgenden nun die Erläuterung, warum die zweite Frequenz zur Kompensation des Ionosphäreinflusses notwendig ist: Die Ionosphäre ist der Bereich der Atmosphäre, der sich aufgrund solarer Strahlung mit Ionen, d.h. geladenen Teilchen, anreichern kann. Die Ionen-Konzentration ist abhängig vom Sonnenstand, sie weist daher sowohl einen Tages- wie auch einen Jahresgang auf (nachts ist die Ionisation geringer). Die Ionisation beeinflusst nun die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Funkwellen merklich – je höher

die Ionisation, um so langsamer breiten sich Radiowellen aus. Hieraus ist der große Einfluss des Zustandes der Ionosphäre auf die gemessene Position ersichtlich; es ergibt sich ein Messfehler von typisch 3 m (**Tabelle 1**).

Der Abstand des Satelliten zum GPS-Empfänger, als Range R bezeichnet, ergibt sich durch Multiplikation von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Laufzeit Δt des Signals.

Wegen der je nach Ionenkonzentration veränderten Ausbreitungsgeschwindigkeit entstehen die genannten und durch die Ionosphäre verursachten Messfehler. Durch die Verwendung von zwei verschiedenen Signalfrequenzen lässt sich der Einfluss der Ionosphäre aber weitgehend kompensieren. Der Einfluss der Ionosphäre auf die Laufzeit ist bei höherer Frequenz geringer als bei tiefer, zudem verhält sich die Beeinflussung der Laufzeit quadratisch zur Frequenz. Verringert sich nun die Laufzeit, dann wird eine kürzere als die tatsächliche Strecke zwischen Satellit und Empfänger angenommen. Der Messfehler der Entfernung R in Abhängigkeit von Signalfrequenz und Ionisationsstärke ist in **Bild 4** dargestellt.

Da jedes Satellitensignal sich durch eine andere Ionisationsschicht ausbreitet, ist der R-Messfehler bei jedem Satelliten unterschiedlich. Es ist sinnvoll, diesen Fehler individuell zu kompensieren. Sendet der Satellit Navigationsinformationen auf zwei Frequenzen (f_1 und f_2), so kann der R-Messfehler ΔR für die R-Messung mit der Frequenz f_1 nach folgender Formel [9] bestimmt werden:

Fehlerursache	Fehler
Ephemeridendaten (bestimmen die Satellitenposition)	1,5 m
Satellitenuhren	1,5 m
Einfluss der Ionosphäre	3,0 m
Einfluss der Troposphäre	0,7 m
Mehrwegeempfang (Multipath)	1,0 m
Einfluss des Empfängers	0,5 m
Totaler RMS-Wert	4,0 m

Tabelle 1. Ursachen für Positionsbestimmungs-Fehler im GPS (typische Werte)

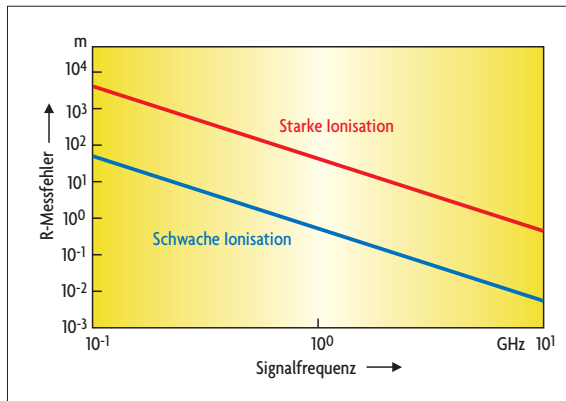


Bild 4. Der Range-Messfehler in Abhängigkeit von Ionisation und Frequenz.

$$\Delta R = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \cdot (R_1 - R_2)$$

R_1 und R_2 sind die mit f_1 und f_2 gemessenen (fehlerhaften) Entfernungen. Der errechnete Messfehler ΔR kann zur Korrektur der Entfernungsmessungen R_1 und R_2 verwendet werden.

Die Modernisierung von GPS

Wie bereits erwähnt, ist die Erneuerung der GPS-Komponenten in vollem Gange bzw. geplant. Die neuen Satelliten senden bereits neue Signale auf zusätzlichen Frequenzen, und weitere Signale werden dazukommen. Die Kontrollinfrastruktur von GPS, das so genannte Kontrollsegment, wird ebenfalls erneuert bzw. erweitert.

Erneuerung und Erweiterung des Kontrollsegments

Bis zum Jahre 2000 bestand das Kontrollsegment (Operational Control System OCS) aus einem Hauptquartier (Master Control Station, MCS), lokalisiert im US-Staat Colorado, aus fünf mit Atomuhren ausgerüsteten Monitorstationen (MS), weltweit verteilt in der Nähe des Äquators, und drei Bodenkontrollstationen (Ground Control

Station, GCS) zur Übermittlung der Informationen zu den Satelliten.

Die wichtigsten Aufgaben des Kontrollsegments sind die Beobachtung der Satellitenbewegungen und Berechnung der Bahndaten (Ephemeriden), die Überwachung der Satellitenuhren und Vorhersage ihres Verhaltens, die Zeit-

synchronisation der Satelliten, das Übermitteln der genauen Bahndaten des im Funkkontakt stehenden Satelliten, die Übermittlung der ungenauen Bahndaten aller Satelliten (Almanach), die Übermittlung weiterer Informationen sowie des technischen Zustandes aller Satelliten (Status, Uhrenfehler usw.).

Das Kontrollsegment wurde und wird noch massiv erweitert [10] um eine alternative Master Control Station in Kalifornien (AMCS, als Backup und für Ausbildungszwecke), um elf weitere Monitorstationen, die es nun ermöglichen, dass jeder GPS-Satellit von mindestens zwei Monitorstationen der insgesamt 16 Stationen überwacht

sammeln und auszuwerten. Diese Stationen sind großräumig über den gesamten Globus verteilt angeordnet.

Zusätzliche Signale und Frequenzen

Seit 2005 strahlen die neu in Erdumlauf gebrachten Satelliten das zweite zivile Signal L2C auf der Frequenz von 1227,60 MHz aus. Am 24. März 2009 wurde der erste Satellit GPS IIR-20(M) mit dem zusätzlichen Signal L5 erfolgreich gestartet. In Zukunft soll noch ein weiteres ziviles Signal, interoperabel zum europäischen Satellitennavigationssystem Galileo, ausgestrahlt werden. Dieses Signal soll L1C genannt werden. Nach Ausbau des Systems werden die zivilen Signale gemäß **Tabelle 2** zur Verfügung stehen.

Die Prinzipien der BPSK-Modulation (Binary Phase Shift Keying Modulation) und der BOC-Modulation (Binary Offset Carrier Modulation) wurden in einer früheren Publikation [11] eingehend besprochen.

Die MBOC-Modulation für das Signal L1C

Die USA und die EU haben am 26. Juli 2007 vereinbart, für GPS und Galileo die gleiche Modulationsart zu verwenden. Die neue Modulation, genannt MBOC (6,1,1/11), wird für das neue GPS-Signal L1C (L1 Civil) und für das Galileo-Signal L1 OS eingesetzt. Die MBOC-Modulation (Multiplexed BOC) ist eine Erweiterung der BOC-Modulation, sie kombiniert zwei

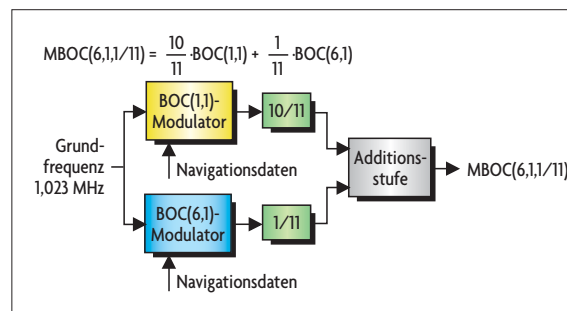


Bild 5. Aufbau eines MBOC(6,1,1/11)-Modulators für L1C und L1 OS.

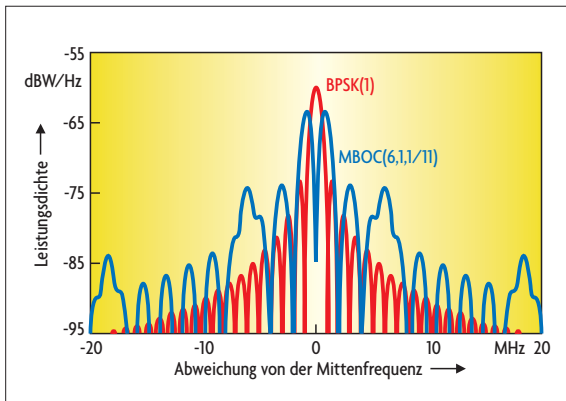
wird, sowie um zwei Bodenkontrollstationen. (Die US Air Force betreibt noch weitere Bodenkontrollstationen, die Air Force Satellite Control Network Remote Tracking Stations, AFSCN-RTS, für militärische Zwecke. Auf diese Stationen wird nicht weiter eingegangen.) Schließlich soll noch ein Monitor Station Network Control Center (MSNCC) hinzukommen, das die Aufgabe hat, die Monitorstationen zu

BOC-Modulatoren und addiert beide Signale mit unterschiedlicher Gewichtung (**Bild 5**).

Durch die Kombination von zwei BOC-Signalen steht bei höheren Frequenzen mehr Leistung zur Verfügung (**Bild 6**). Dadurch wird die Tracking-Eigenschaft verbessert, und die Empfänger werden unempfindlicher gegenüber Rauschen, Interferenzen und Mehrwegeempfang. Um alle Eigen-

Signal	Mittenfrequenz	Modulation	Bandbreite
L1-C/A	1575,42 MHz	BPSK(1)	2,046 MHz
L2C	1227,60 MHz	BPSK(1)	2,046 MHz
L5	1176,45 MHz	BPSK(10)	20,46 MHz
L1C	1575,42 MHz	MBOC(6,1,1/11)	4,092 MHz

Tabelle 2. Technische Daten der zivilen GPS-Signale



I Bild 6. Leistungsichte von MBOC(6,1,1/11) in Abhängigkeit von der Abweichung zur Mittenfrequenz, verglichen mit BPSK(1) ($P = 1$ W pro Signal).

schaften voll auszunutzen, muss die Bandbreite des Empfängers ca. 20 MHz betragen (bei BPSK(1) ca. 2 MHz).

■ Die neuen Satellitengenerationen

Die GPS-IIF-Satelliten

Nach Abschluss des letzten GPS-IIR-M wird eine neue Serie mit verbesserten Eigenschaften [12] ins All gebracht: der Block GPS IIF (Block 2, Follow-ON). Diese Satelliten werden von Boeing gebaut. Es ist geplant, von 2009 bis 2014 zwölf IIF in Umlauf zu bringen. IIF-Satelliten senden ein neues, drittes ziviles Signal auf der Frequenz von 1176,45 MHz (L5-Frequenz). Dieses Signal soll ca. eine viermal höhere Leistung als die vorherigen zivilen Signale L1-C/A und L2C haben; es kann für kritische Anflüge in der Luftfahrt verwendet werden. Dank dieser dritten Frequenz wird der Einfluss der Ionosphäre noch weiter vermindert.

GPS III

Ab 2014 ist der Start einer neuen Satellitengeneration geplant. Diese neue Reihe, gebaut von Lockheed Martin [13] wird die Be-

zeichnung GPS III (Block 3) haben. GPS III wird dank verbesserter Komponenten die Genauigkeit der Ortungs- und Zeitmessung weiter erhöhen. Mit dieser Generation wird das Signal L1C, interoperabel mit dem Open Service Signal von Galileo, eingeführt. Der erste Block von zwei Satelliten dieser neuen Genera-

tion, benannt GPS IIIA (Bild 7), wird zur Zeit in den Werken von Lockheed Martin getestet. Die US-Regierung hat sich eine Bestelloption von zehn zusätzlichen Satelliten des Typs GPS IIIA gesichert. Im Anschluss an die zwölf GPS-IIIA-Satelliten sollen acht GPS IIIB und 16 GPS IIIC gebaut und in Umlauf gebracht werden.

Wenn GPS III vollständig in Betrieb sein wird (2020?), werden die Satelliten untereinander Daten austauschen (intersatellare Verbindungen, ähnlich wie bei den Kommunikationssatelliten Iridium). Dank dieser Verlinkung können alle Satelliten von einer Bodenstation gewartet werden.

Weiter soll die Signalstruktur des zivilen L1-C/A-Signals verbessert werden. GPS-III-Satelliten werden Integritätssignale aussenden, eine Search- und Rescue-Möglichkeit bie-

ten und keine eingebaute technische Möglichkeit für die Erzeugung der künstlichen Verschlechterung (Selective Availability, SA) mehr haben. Dies soll das Vertrauen bezüglich der Verfügbarkeit des US-Systems endgültig steigern. *ha*

Links und Literatur

- [1] http://telecom.tlab.ch/~zogg/weitere_publicationen.html
- [2] <http://tycho.usno.navy.mil/gpsinfo.html>
- [3] www.fas.org/spp/military/program/nav/990125-gps.htm
- [4] www.ulalaunch.com/
- [5] <http://tycho.usno.navy.mil/gpscurr.html>
- [6] www.nstb.tc.faa.gov/
- [7] www.nstb.tc.faa.gov/
- [8] www.navcen.uscg.gov/GPS/almanacs.htm
- [9] Kaplan, E.D.: Understanding GPS. Second Edition, Artech House, Page 313.
- [10] www.pnt.gov/public/2008/2008-12-ICG/USbriefing.ppt
- [11] Zogg, J.-M.: Von GPS zu Galileo – Die Weiterentwicklung der Satelliten-Navigation. *Elektronik* 2006; Teil 1: Navigationstechnische Grundlagen, GPS und GLONASS: H. 4. S. 58ff.; Teil 2: Galileo: Technik und Anwendungen: H. 5, S. 50ff.
- [12] www.boeing.com/defense-space/space/gps/index.html
- [13] www.lockheedmartin.com/products/GPS/index.html



I Bild 7. Ab 2014 sollen die Satelliten des Blockes IIIA betriebsbereit sein.

(Quelle: Lockheed Martin)



**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 ein Fachbuch zum Thema „Telemetrie mit GSM/SMS und GPS-Einführung“.

jean-marie.zogg@htwchur.ch
www.zogg-jm.ch