

# Kommt Galileo zu spät?

Bernhard Hofmann-Wellenhof

## Zusammenfassung

In der kurzen Geschichte des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo ist es bisher zu großen Verzögerungen gekommen. Nach den ursprünglichen Plänen hätte die Vollausbaustufe im Jahr 2008 erreicht werden sollen. Nach heutigem Stand ist mit FOC (Full Operational Capability) für Galileo etwa um das Jahr 2020 zu rechnen. Bereits in den Jahren 1995 bzw. 1996 erreichten die unter militärischer Kontrolle stehenden Systeme GPS (Global Positioning System) der USA und das russische GLONASS (Global Navigation Satellite System) das Stadium der Vollausbaustufe und weitere Länder wie China und möglicherweise Indien entwickeln gegenwärtig global verfügbare Systeme. Daher stellt sich die Frage, ob Galileo einerseits überhaupt noch sinnvoll ist, da ja ausreichend (und in naher Zukunft noch mehr) andere Systeme verfügbar sind, und andererseits, ob noch Marktchancen gegeben sind. Daher wird der aktuelle Stand der Entwicklungen der globalen Satellitennavigationssysteme beschrieben, die Frage nach der Notwendigkeit von so vielen globalen Systemen beantwortet und eine Abschätzung des Marktes basierend auf dem GNSS Market Report der GSA (European GNSS Agency) gemacht.

## Summary

*Substantial delays have occurred in the short history of the European Global Navigation Satellite System Galileo. Originally, Galileo FOC (Full Operational Capability) should have been achieved in 2008. Currently, about 2020 is the envisaged date of completion. This delay must be seen in the light of non-European developments. In 1995 and 1996, respectively, the military-operated systems GPS (Global Positioning System) of the US and the Russian GLONASS (Global Navigation Satellite System) achieved FOC. Other countries like China and possibly India are also developing their own systems. Thus, the question arises if Galileo makes sense at all given that sufficient other systems are available and that the number of systems will increase in the near future. In addition to this question it is of interest to estimate the market potential. The current status of the systems and the respective developments are described. The question for the need of so many systems will be answered and some aspects of the market potential based on the market report of the GSA (European GNSS Agency) will be given.*

**Schlüsselwörter:** Galileo, GNSS, GSA Market Report

## 1 Einleitung – Galileo heute und morgen

Seit über zehn Jahren bietet das Institut für Navigation der Technischen Universität Graz eine Galileo-Lehrveranstaltung an. Da stellt sich zunächst die Frage, wo steht Galileo, das europäische globale Satellitennavigationssystem, heute? Abb. 1 zeigt eine Darstellung, die vielfach auf Vorträgen gezeigt wird und die bezüglich der zeitlichen Stufen am öftesten geändert wurde. Die Stufen blieben im Wesentlichen immer gleich, jedoch die angeführten Jahre für die geplante Fertigstellung haben sich immer wieder verschoben (und werden auch heute noch für die noch bevorstehenden letzten beiden Stufen mit unterschiedlichem Optimismus gezeigt). Auf die Hintergründe der zahlreichen Verzögerungen wird nicht eingegangen, aber es soll erwähnt werden, dass es sich bei Galileo, anders als bei GPS und GLONASS, um ein System unter ziviler Kontrolle handelt und dass bei den Diskussionen um die Entwicklungsschritte immer ein Konsens auf europäischer Ebene – EU (Europäische Union) und ESA (European Space Agency) – gefunden werden muss. Positiv gesehen, zum Jahresende 2012, sind die in Abb. 1 gezeigten ersten drei Stufen von Galileo erreicht. Das bedeutet, im Rahmen der Version 1 des »Galileo system testbed« wurden zahlreiche Algorithmen entwickelt und getestet, die beiden Probesatelliten GIOVE-A und GIOVE-B wurden erfolgreich in den Jahren 2005 und 2008 gestartet und schließlich wurden die ersten vier »echten« Galileo-Satelliten in ihre Umlaufbahnen gebracht. Der letzte Start mit zwei Satelliten an Bord einer russischen Sojus-Trägerrakete erfolgte am 12. Oktober 2012.

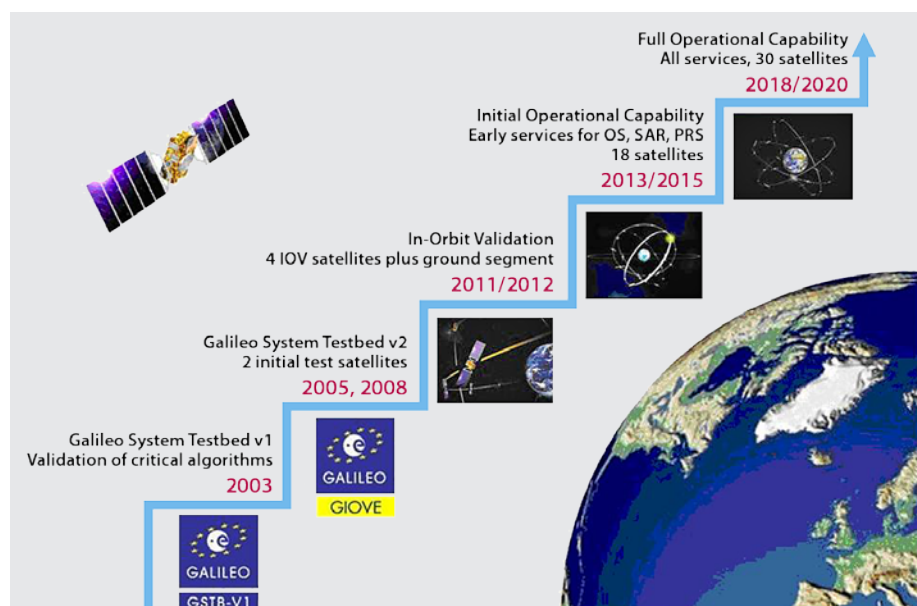


Abb. 1: Die Galileo-Entwicklungsstufen aus heutiger Sicht – ursprünglich hätte die letzte Stufe bereits 2008 erreicht werden sollen.

Mit vier Satelliten lässt sich, wenn ihre Signale simultan empfangen werden können, die Position des Beobachters bestimmen und durch dreidimensionale Koordinaten, beispielsweise geographische Breite und Länge sowie Höhe, darstellen. Zum Zeitpunkt des Schreibens dieses Artikels (Dezember 2012) lässt sich trotzdem noch keine Galileo-Positionsbestimmung demonstrieren, da die beiden im Oktober gestarteten Satelliten noch in einer Test-

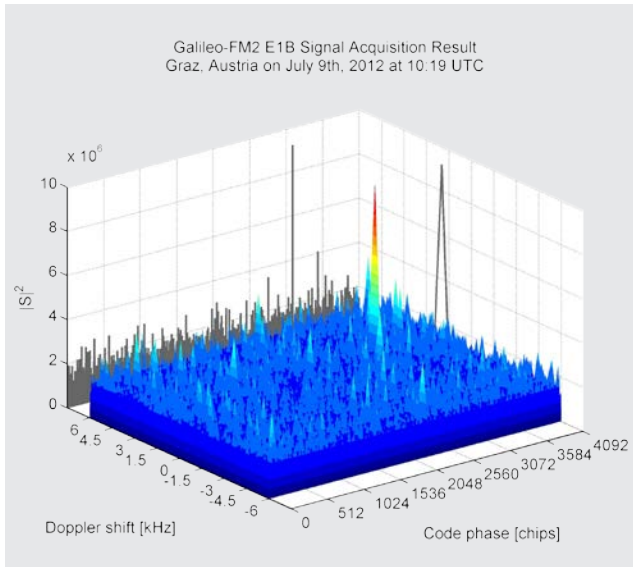


Abb. 2: Erfolgreiche Akquisition eines Galileo-Signals im Doppler- und Code-Suchraum

phase sind und voraussichtlich erst etwa im April 2013 zur Verfügung stehen werden.

Wie kurzlebig die Geschichte der Satellitennavigation ist, sei mit einem Satz erwähnt: Ende Juni 2012 wurde GIOVE-A offiziell abgeschaltet und am 23. Juli 2012 auch GIOVE-B, siehe Institute of Navigation (2012). Damit endet ein kurzer, aber sehr erfolgreicher Abschnitt von Galileo. Immerhin war der von SSTL (Surrey Satellite Technology Limited) gebaute GIOVE-A mit einer konzipierten Lebenszeit von 27 Monaten für rund 78 Monate im Dienst.

Zurück in die Gegenwart. Um dem Leserpublikum trotzdem etwas zeigen zu können, hat Dipl.-Ing. Philipp Berglez von der Grazer Firma TeleConsult Austria GmbH aus seiner noch im Begutachtungsstadium befindlichen Dissertation »Development of a multi-frequency software-based GNSS receiver«, die im Jahr 2013 erscheinen wird, die in Abb. 2 und Abb. 3 gezeigten Grafiken angefertigt. Der Autor erklärt die beiden Abbildungen folgendermaßen: »Die 3D-Graphik (Abb. 2) zeigt den Suchraum (Doppler und Code), wobei der Peak das Vorhandensein des Signals (Galileo OS E1B Signal) anzeigt. Die zweite Graphik (Abb. 3) zeigt den Längsschnitt des Doppler-Suchraums. Schön zu sehen sind bei der Code-Phase (Korrelation des Codes) die Sidepeaks, die durch die BOC-Korrelation verursacht werden.« Der Vollständigkeit halber sei nur ergänzt: IOV bedeutet In Orbit Validation, OS steht für Open Service und BOC ist das Akronym für

Binary Offset Carrier. Für nähere Erklärungen dieser Ausdrücke siehe Hofmann-Wellenhof et al. (2008, Abschnitte 11.3.1 bzw. 4.2.3).

Ein Blick in die Zukunft mit Bezug auf Abb. 1: Die beiden noch ausstehenden Stufen sind IOC (Initial Operational Capability) mit 18 verfügbaren Satelliten voraussichtlich im Jahr 2015 und FOC hoffentlich im Jahr 2020. Das sind sehr ambitionierte Pläne, denn immerhin müs-

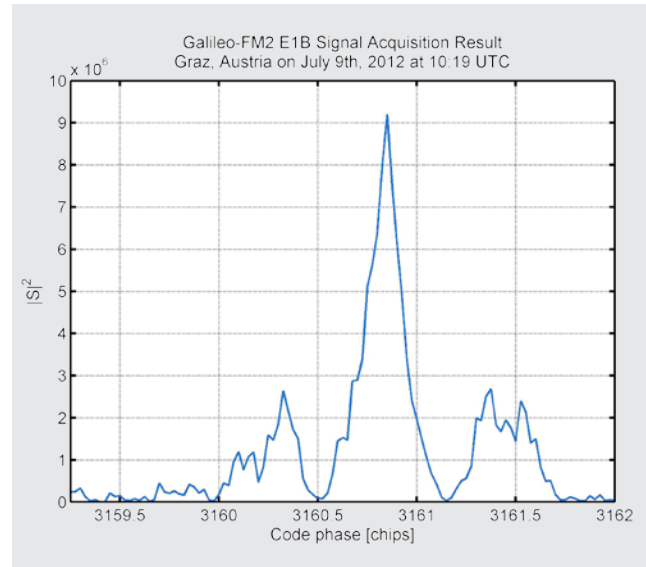


Abb. 3: Darstellung des Doppler-Suchraums für das Galileo-Signal (Längsschnitt aus Abb. 2)

sen bis 2015 noch vierzehn Satelliten gestartet werden! Dazu reichen zwei Satelliten pro Trägerraketenstart, wie mit der Sojus-Trägerrakete möglich, nicht aus, sondern es muss auch die europäische Trägerrakete Ariane 5 verwendet werden, die bis zu vier Satelliten mit einem Start ermöglicht. Daher kam es am 2. Februar 2012 in London zu einem wichtigen Vertragsabschluss, der zu folgender Pressemeldung (gekürzt) führte:

»Jean-Yves Le Gall, Chairman and CEO of Arianespace, and Didier Faivre, Director of the Galileo Program and Navigation-related Activities at the European Space Agency (ESA), today signed an agreement in London to launch satellites in Europe's Galileo satellite positioning system by Ariane 5 launchers.

This agreement provides for the possibility of using Ariane 5 launchers in 2014 and 2015 to complete the deployment of the Galileo constellation. Arianespace will have launched the 26 satellites in this constellation using a combination of Soyuz launch vehicles (two satellites per launch), and Ariane 5 launchers (four satellites per launch). The contract for adapting the Ariane 5 launcher to enable simultaneous launch of four Galileo satellites was also signed today by the European Space Agency and EADS-Astrium.

The Galileo satellite launch contract is managed by ESA on behalf of the European Commission. The contract signing ceremony was also attended by David

Willets, U.K. Minister of State for Universities and Science, and Antonio Tajani, Vice President of the European Commission.

These satellites, built by the team of OHB Technology of Germany and Surrey Satellite Technology, Ltd. of the United Kingdom, will be placed in a circular orbit at an altitude of 23,000 kilometers by Soyuz and Ariane 5 launchers operating from the Guiana Space Center in French Guiana.«

So weit das Zitat der Pressemitteilung. Das ist schon großartige europäische Ingenieurskunst gepaart mit hervorragender Diplomatie! Man muss sich das im Detail vorstellen: Die russische Trägerrakete Sojus wird in Teilen nach Kourou in Französisch-Guayana in Südamerika gebracht, dort assembliert und auf der eigens dafür vorbereiteten Startrampe ins All geschickt. Zusätzlich gibt es die europäische Trägerraketenentwicklung Ariane, die vier Galileo-Satelliten mit einem Start ins All befördern wird.

Die Zukunft von Galileo reicht aber längst über die angegebene Zeitschiene hinaus. So wurde von der ESA im Februar 2012 das Konzept »for the extension of the European GNSS Evolution Programme« publiziert, das die Weiterentwicklung von Galileo und EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) bis 2030 analysiert, siehe ESA (2012).

Nach diesem Lob für die europäische Weltraumtechnik kommt die Titelfrage »Kommt Galileo zu spät?« in Erinnerung. Im folgenden Abschnitt wird über den Stand der bereits bestehenden Systeme GPS und GLONASS sowie über weitere Entwicklungen berichtet, mit denen Galileo verglichen werden muss.

## 2 GNSS – Europa ist nicht allein

Eine gerne gezeigte Darstellung von GNSS (Global Navigation Satellite Systems) zeigt Abb. 4, die eine gute Übersicht gibt, welche Länder an der GNSS-Entwicklung beteiligt sind. Wichtig ist dabei festzuhalten, dass man unter GNSS nicht nur die globalen Systeme in der ersten Spalte der Figur in Abb. 4 versteht, sondern auch die regionalen Komponenten und die sogenannten Augmentierungen, also Ergänzungen oder Erweiterungen zu bestehenden Systemen.

Globale Systeme (erste Spalte von Abb. 4), also Systeme, die überall auf der Erde und auch im erdnahen Raum verwendet werden können, sind die bereits vollständig verfügbaren Systeme GPS der Vereinigten Staaten und das russische GLONASS. Im Aufbaustadium sind das europäische Galileo und das chinesische Compass (auch Beidou genannt). Derzeit ist nicht klar, ob Indien ein GINS (Global Indian Navigation System) voll entwickeln und fertigstellen wird.

Zu den regionalen Systemen (zweite Spalte von Abb. 4), also Systeme, die nur bestimmte Regionen abdecken, gehören das japanische QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), das die ostasiatische Region und Ozeanien abdeckt, und das indische IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System).

Regionale Systeme sind Systeme, die nur regional eingesetzt werden können, weil nur in den entsprechen-

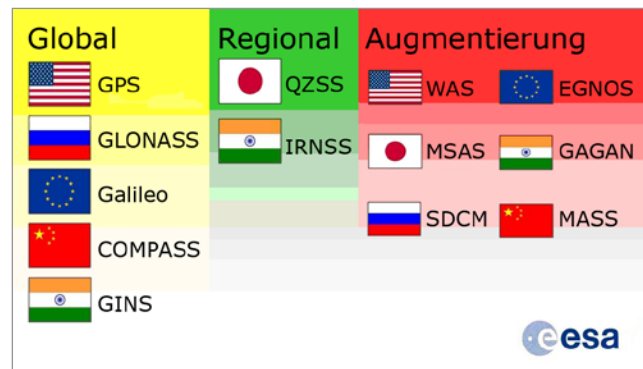


Abb. 4: GNSS: Kategorisiert nach globalen und regionalen Systemen sowie Augmentierungen mit den Entwicklungen der durch die entsprechenden Flaggen dargestellten Länder

den Regionen die Satellitensignale empfangen werden können.

Die dritte Spalte in Abb. 4 listet Augmentierungen auf. Was versteht man darunter im Detail? Hofmann-Wellenhof (2012): »Unter Augmentierungen versteht man zusätzliche Komponenten, die zu einem globalen oder regionalen System gehören. Warum werden diese benötigt? Die Services, die z. B. von GPS und GLONASS angeboten werden, reichen mit ihren Leistungen im Alltag vielfach nicht aus. Typische Beispiele sind Landungen von Flugzeugen oder Hafennäherungen bzw. Einfahrten in Häfen von Schiffen. Für derartige Operationen reicht weder die Genauigkeit noch die Integrität des Services. Um diese Defizite zu beheben, wurden die Augmentierungen konzipiert und umgesetzt.« Und aus derselben Quelle die Erklärung zu den in Abb. 4 angeführten Augmentierungen: »Zum amerikanischen GPS gehört das Wide Area Augmentation System (WAAS), zum russischen GLONASS das System for Differential Correction and Monitoring (SDCM). In Japan wird das Multi-Transport Satellite-based Augmentation System (MSAS) verwendet, in Indien GAGAN (benannt nach dem Hindi-Wort für Himmel) und in China das Satellite Navigation Augmentation System (SNAS) – es existiert für die chinesische Augmentierung auch das Akronym MASS. Und in Europa? Da existiert das European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), dessen Open Service am 1. Oktober 2009 für operationell erklärt wurde. Dabei handelt es sich um eine für Europa konzipierte Ergänzung zu GPS.«

Da Galileo zu den globalen Satellitennavigationssystemen gehört, ist es ausreichend, sich auf die globalen Systeme zu beschränken und die regionalen Systeme sowie die Augmentierungen nicht weiter zu analysieren. Eine



weitere Einschränkung kann insofern gemacht werden, als GINS, das indische System, noch zu weit weg von einer Realisierung ist.

Somit bleiben GPS, GLONASS und Compass als Mitbewerber für den Markt, der im Abschnitt 4 behandelt werden wird. Zwei bewährte Systeme und zwei, die noch in der Entwicklung stehen – kann man diesen Vergleich überhaupt ziehen? Ja, denn GPS und GLONASS sind in die Jahre gekommen und unterliegen derzeit einem langwierigen Modernisierungsprozess. Zum besseren Verständnis folgt daher jeweils ein ganz kurzer Blick auf den Stand der Systeme.

### GPS

Mit Stand Juni 2012 waren zehn Block IIA, zwölf Block IIR, sieben Block IIR-M und zwei Block IIF Satelliten in ihrer Bahn. Für nähere Details der Blockbezeichnungen und der zugehörigen Unterschiede sei auf Hofmann-Wellenhof et al. (2008, S. 323/324) verwiesen. In der genannten Reihenfolge handelt es sich um immer stärker modernisierte Versionen. Von den insgesamt 31 Satelliten haben vier den Status eines aktiven Reserve-satelliten. Diese Satelliten stehen also für Messungen zur Verfügung, können aber bei Bedarf sehr schnell an den Platz eines Satelliten, der nicht mehr funktioniert, gebracht werden. Bemerkenswert ist, dass in den Jahren 2009, 2010 und 2011 insgesamt nur drei neue Satelliten in ihre Bahn gebracht wurden. In den kommenden Jahren sind jeweils drei neue Satelliten pro Jahr vorgesehen. Das bedeutet, die Satelliten werden nach Bedarf ersetzt und nicht, um das laufende Modernisierungsverfahren zu beschleunigen. Nach dem GPS Architecture Evolution Plan werden die derzeit modernsten GPS-Satelliten, das sind die Block IIF Satelliten, in der Periode 2010 bis 2018 produziert. Überlappend beginnt mit dem Jahr 2014 die Phase der Block III Satelliten, die etwa mit dem Jahr 2021 abgeschlossen sein soll. Durch »budget battles«, siehe Institute of Navigation (2012, S. 17), rechnet man auch hier mit Verzögerungen und der Start des ersten GPS III Satelliten wird wohl erst 2015 erfolgen. Aus den Modernisierungsplänen geht hervor, dass um das Jahr 2020 (Galileo FOC erwartet) der Modernisierungsprozess abgeschlossen sein wird und GPS und Galileo eine sehr ähnliche Leistungsfähigkeit aufweisen werden.

### GLONASS

Mit Stand Juni 2012 waren wie bei GPS insgesamt 31 Satelliten in ihrer Bahn, davon allerdings nur 23 operationell, da einer noch getestet wurde, drei gewartet wurden und vier als Reservesatelliten fungierten. Die Nachfolgenerationen der ursprünglichen Satelliten werden mit den Buchstaben M, dann K und schließlich KM bezeichnet. Ein Meilenstein der Modernisierung wurde mit der K-Generation erreicht. Diese Generation wird durch das CDMA (Code Division Multiple Access)-Prinzip an das GPS- und Galileo-Konzept, alle Satelliten mit einem eigenen Code auszustatten (aber einheitlichen Trägerfre-

quenzen), angepasst. Bis zu diesem Zeitpunkt war FDMA (Frequency Division Multiple Access) für GLONASS charakteristisch, also unterschiedliche Frequenzen für die Satelliten, aber ein einheitlicher Code. Die KM-Generation ist noch im Konzeptstatus.

Die Geschichte von GLONASS ist von einem langen Wellental gekennzeichnet. Nachdem man es im Kalten Krieg geschafft hatte, bei der Entwicklung des Satellitennavigationssystems mit den USA mitzuhalten und nahezu gleichzeitig FOC zu erreichen, kam unmittelbar danach der Niedergang der Satellitenanzahl: nach 24 Satelliten im Jahr 1996 gab es nur mehr sechs Satelliten im Jahr 2001, da die finanziellen Mittel fehlten, die Satelliten rechtzeitig durch neue zu ersetzen. Es dauerte bis zum Jahr 2012, ehe FOC wieder erreicht werden konnte.

Gegenwärtig ist der Modernisierungsprozess wie bei GPS voll im Gange. Es gibt einen Plan zur Verbesserung der erzielbaren Genauigkeit, eine Modernisierung des Bodenkontrollsegments (Ausdehnung des Netzwerks der Bodenstationen, Verbesserung der Systemzeit, Verbesserung der Bahndaten, Monitorstationen auch außerhalb von russischem Territorium). Und, wie bei GPS auch, kommen neue und zusätzliche Signale mit jeder neuen Satellitengeneration. Durch CDMA gibt es auch eine wesentlich erleichterte Interoperabilität mit GPS und Galileo.

Im Jahr 2020 wird GLONASS durch die Modernisierung mit GPS (und hoffentlich Galileo) aus der Sicht der Leistung vergleichbar sein.

### Compass

Ursprünglich hieß das rein militärische System BeiDou. Mittlerweile aber, wohl mit Blick auf den Weltmarkt, spricht man von Compass, das schließlich zivil und militärisch genutzt werden wird (aber jedenfalls unter militärischer Kontrolle steht). Der erste Satellit wurde im Jahr 2007 gestartet. Mit Stand Juni 2012 besteht das System aus insgesamt 13 Satelliten, davon sind drei MEO (Medium Earth Orbit) Satelliten, fünf GEO (geostationary) und fünf IGSO (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit). Mit Compass-1 wird die regionale, bereits verfügbare Abdeckung bezeichnet (fünf GEO, drei IGSO und vier MEO).

Die nächste Stufe, Compass-2, wird 2020 operationell sein, eine globale Abdeckung ermöglichen und aus 24 MEO, 3 GEO und 3 IGSO bestehen.

Aus dieser kurzen Betrachtung wird für alle Systeme das Schlüsseljahr 2020 erkennbar. Wenn bei allen vier Systemen (GPS, GLONASS, Galileo, Compass) die Entwicklungen wie geplant laufen, dann werden diese vier Systeme nahezu gleichwertig in Bezug auf die Leistungsfähigkeit sein. Damit kann man aber schon eine erste wichtige Antwort auf die Titelfrage geben: Sollte der Zeitplan für Galileo eingehalten werden und FOC mit 2020 erreicht sein, dann ist das rechtzeitig, um auf dem Weltmarkt reüssieren zu können.

### 3 Je mehr GNSS desto besser?

Bisher wurden die Satellitennavigationssysteme individuell betrachtet. Wie sieht es aus, wenn man die Systeme kombiniert und gemeinsam nutzt? Bringt das eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit? Eine weitere Frage: Kann es manchmal notwendig sein, eine Kombination von Systemen zu verwenden?

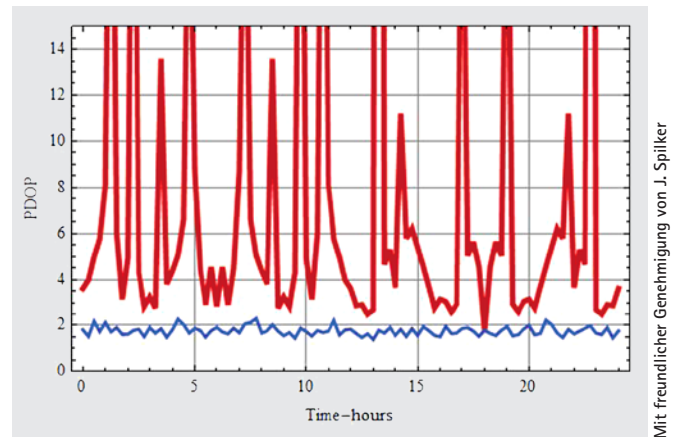
Auch wenn es in eine wissenschaftliche Zeitschrift wie die vorliegende nicht so gut passt, kann man »populärwissenschaftlich« argumentieren, ohne im Detail auf fehlertheoretische Abhandlungen einzugehen und ohne standardisierte Genauigkeiten und Genauigkeitsmaße zu verwenden. Dies deshalb, weil potenzielle Anwenderinnen und Anwender immer wieder unrichtige Hoffnungen äußern. Daher können folgende Aussagen als Faustregel (ohne jeden Literaturnachweis) für die dominante Massenmarktanwendung, die Positionierung mit Codemessungen, festgehalten werden:

1. Die Genauigkeit für die Einzelpunktbestimmung basierend auf einer Messepoche mit GPS beträgt im freien Gelände etwa 3 bis 5 m.
2. Wird angenommen, Galileo sei bereits verfügbar und wird mit GPS kombiniert, dann erreicht man mit demselben Messverfahren, also Einzelpunktbestimmung basierend auf einer Messepoche mit GPS und Galileo, im freien Gelände eine Genauigkeit von etwa 3 bis 5 m. Anders ausgedrückt, es erfolgt keine Genauigkeitssteigerung, weil die signifikanten Fehlereinflüsse (Bahnfehler, Satellitenuhrfehler und atmosphärische Fehler) durch die Kombination von mehreren Systemen für dieses Messverfahren nicht signifikant reduziert werden. Das gilt auch dann noch, wenn weitere Systeme (GLONASS, Compass) hinzugenommen werden.
3. Die Situation ändert sich sofort, wenn es bei der Messung zu Abschattungen von Satellitensignalen kommt, z.B. in Städten oder im stark gebirgigen Gelände. Im Extremfall kann es vorkommen, dass die minimal erforderliche Anzahl von vier Satelliten für die dreidimensionale Punktbestimmung nicht mehr verfügbar ist. Dann gibt es mit einem System allein überhaupt keine Lösung. Werden mehrere Systeme kombiniert, ist die Chance groß, insgesamt zumindest wieder von vier Satelliten Signale empfangen zu können.

Zu Punkt 3 zeigt Abb. 5 ein eindrucksvolles Beispiel, das auch schon in Hofmann-Wellenhof (2012) gezeigt wurde und das die Notwendigkeit zeigt, in bestimmten Situationen eine Kombination von Systemen verwenden zu müssen.

Zitat aus Hofmann-Wellenhof (2012): »In Abb. 5 ist folgendes Szenario dargestellt: ein Beobachtungsstandort in Kalifornien mit starken Abschattungen, sodass Satelliten erst ab einem Elevationswinkel von 30 Grad gesehen werden können. Wenn für diesen Standort die Geometrie der GPS-Satelliten, die durch PDOP (Position Dilution of Precision) dargestellt ist, für 24 Stunden berechnet wird, resultiert der rote Graph. Von einer guten Geometrie

spricht man, wenn PDOP kleiner als 3 ist. Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass die GPS-Satelliten allein nahezu den ganzen Tag über keine gute Geometrie aufweisen. Das ändert sich signifikant, wenn die Galileo-Satelliten dazugenommen werden. Der dann resultierende blaue Graph zeigt eine signifikante Verbesserung, denn nun liegt der PDOP-Wert für den ganzen Tag meist unter 2. Situationen mit starker Abschattung kommen insbesondere in Städ-



Mit freundlicher Genehmigung von J. Spilker

Abb. 5: PDOP für GPS (rot) und für GPS+Galileo (blau)

ten, aber auch im alpinen Gelände häufig vor.« Mit diesem Beispiel wurde gezeigt, wie insbesondere in Städten und in topografisch anspruchsvollem Gelände die Kombination von Systemen sinnvoll (und vielfach notwendig) ist.

PDOP ist ein Maß für die Geometrie der Satelliten in Bezug auf den Beobachter und beeinflusst direkt die Genauigkeit. Jetzt erhebt sich die Frage, wie PDOP verbessert wird, wenn man ein System allein, kombiniert mit zwei, mit drei, etc. Systemen betrachtet, wobei jetzt wieder freies Gelände, also keine Abschattungen, angenommen wird. Auf der GNSS-Sommerschule 2012 der ESA in Toulouse wurde dieses Beispiel in einer sehr eindrucksvollen Grafik gezeigt, leider ist die Grafik von der ESA nicht freigegeben, darf aber deskriptiv erläutert werden. Der erste wesentliche Punkt ist, wie schon die Spilker-Grafik (Abb. 5) gezeigt hat, dass die Kombination von zwei Systemen zu hervorragenden PDOP-Werten führen kann. Diese Werte werden sogar weiter verbessert, wenn man zusätzliche Systeme verwendet, allerdings ist die Verbesserung von PDOP durch das dritte System wesentlich geringer als der Übergang von einem auf zwei Systeme. Der Gewinn flacht also schnell ab. Dies gilt auch, wenn weitere Systeme (GLONASS, Compass und möglicherweise GINS) hinzugenommen werden. Entscheidend ist aber, dass sich auch die Systeme nach heutigem Stand der Technik gegenseitig durch Störeinflüsse »behindern«. Somit kommt es zu einer Überlagerung von Effekten: einerseits ein Gewinn an PDOP, andererseits ein negativer Einfluss durch diese gegenseitige Störung. Die Balance zwischen diesen beiden Einflüssen liegt etwa bei der Kombination von zwei bis drei Systemen. Anders ausgedrückt, aus diesen Überlegungen und mit Bezug auf PDOP ist es nicht sinnvoll, mehr als drei Systeme zu kombinieren.

Für die Leserinnen und Leser, die mit dem Thema nicht so vertraut sind, sei angemerkt, dass es mit GPS (und Kombinationen von mehreren Systemen) andere Verfahren und zusätzliche Messgrößen (Phasenmessungen) gibt, wodurch Genauigkeiten im Zentimeter- und Millimeterbereich erreicht werden können. Eine ausgezeichnete Beschreibung bietet Bauer (2011).

#### 4 Galileo und der Markt

Wie sehen die Marktchancen von Galileo aus? Zu diesem Thema gibt es ausreichend Untersuchungen und Publikationen. Die erste ist die Schlagzeile »Galileo will boost economy and make life of citizens easier«, die als MEMO/11/717 von Brüssel am 21. Oktober 2011 ins Internet gestellt wurde ([http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-11-717\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-11-717_en.htm)). Einleitend werden zwei Persönlichkeiten im Abstand von zehn Jahren zum Thema »A Must have for Europe« zitiert. Im Jahr 2001 sagte Carl Bildt, der ehemalige Premierminister von Schweden:

»If Europe really wants to be considered as a serious partner by the United States and keep control of essential functions for its economic development, it must demonstrate that it has the willingness and the means to be present in Space. Galileo is a key test case for the European Union in that respect.«

Und im Jahr 2011, also zehn Jahre später, sagt Antonio Tajani, Vizepräsident der Europäischen Kommission:

»Galileo is of strategic importance for the independence of the European Union regarding satellite navigation and will offer a relevant contribution to the implementation of the Europe 2020 strategy for growth. It will significantly contribute to the economic recovery of Europe and address major challenges such as sustainable transport.«

Um diese beiden Argumente zu bekräftigen, können aus dem sehr ausführlichen GNSS Market Report der GSA einige der wesentlichsten Ergebnisse zusammengefasst werden. Die erste Version dieser Studie stammt vom Oktober 2010, die zweite Version folgte am 29. Mai 2012, aber die Vorhersagen reichen vielfach bis zum Jahr 2020. Zudem inkludieren diese Studien Ergebnisse aus zahlreichen anderen Untersuchungen. Es sei allerdings auch angemerkt, wie vorsichtig diese Prognosen zu nehmen sind, denn die beiden erwähnten Versionen weisen mit Blick auf die Vorhersage bis 2020 doch signifikante Abweichungen auf. Und auch die Prognose von 2010 auf 2012 mit dem Vergleich mit realen Zahlen zeigt, wie schwierig Prädiktionen sind.

Aus dem weltweiten GNSS-Markt für Produkte und Services, beschränkt auf die Hardware, Software, etc., die

direkt GNSS zuzuordnen sind (beim Mobiltelefon sind das beispielsweise nur spezielle Teile davon wie Chip, Karten, Navigationssoftware), kann man ein Gefühl für die Größenordnung bekommen.

##### Aussage 1:

Aus GSA (2012, S. 5) geht hervor, dass sich von 2012 bis 2020 der weltweite GNSS-Markt von 60 Billionen Euro auf 160 Billionen Euro mehr als verdoppeln wird. Die jährliche Wachstumsrate wird bis 2016 etwa 11 % betragen, dann aber stark abflachen! [Zum Vergleich aus GSA (2010, S. 4): von 2012 bis 2020 wird sich der weltweite GNSS-Markt von 87 Billionen Euro auf 165 Billionen Euro bei einer jährlichen Wachstumsrate von 11 % fast verdoppeln. Man beachte den signifikant unterschiedlichen Wert für 2012, daraus resultiert das Argument zur Vorsicht dieser Prognosen.]

Dieser Markt teilt sich auf zahlreiche Segmente auf, wird allerdings von sechs Hauptkomponenten bestimmt: Straßenanwendungen, Location-Based Services (LBS), Landwirtschaft, Vermessung, Luftfahrt, maritime Anwendungen. Mit 54,0 % für die Straßenanwendungen und 43,7 % für LBS bleiben für die Landwirtschaft nur 1,0 %, für die Vermessung 0,6 %, die Luftfahrt 0,5 % und für die maritimen Anwendungen gerade noch 0,1 % vom kumulierten Umsatz. Alle anderen GNSS-Anwendungen fallen signifikant von diesen sechs Hauptkomponenten ab und werden daher in der Studie nicht weiter betrachtet. In der Zeitschrift für Vermessungswesen sei eine kleine Anmerkung mit Genugtuung erwähnt: In der Version 1 der Marktstudie gab es nur vier Hauptkomponenten, in der zweiten sind die Vermessung und die maritimen Anwendungen dazugekommen!

Zu diesen sechs Hauptkomponenten werden nachfolgend einige Erläuterungen gegeben.

##### Straßenanwendungen

Bei den Straßenanwendungen ist gegenwärtig die Fahrzeugnavigation die Hauptanwendung, wobei GNSS-Daten mit Kartendaten kombiniert werden, um Positionierung, Routenplanung und Routenführung zu ermöglichen. Aber auch der große Bereich des Flottenmanagements gehört zu den Straßenanwendungen, um Taxis, Busse, Einsatzfahrzeuge, eine Lastwagenflotte einer Firma optimal einsetzen zu können. Weitere Anwendungen sind Mautsysteme mit GNSS, in Europa derzeit noch ein Stiefkind, das auf wenige Länder beschränkt ist, aber die Untersuchungen zu verstärktem Einsatz in Europa schreiten voran. Galileo kann hier sicher ein Meilenstein sein. In naher Zukunft werden in Europa alle Fahrzeuge mit einem Notrufsystem ausgestattet sein (»eCall«), um in Not geratene Fahrzeuge z. B. von einer Zentrale orten zu können. Weltweit wird bei Fahrzeugen, die mit einem Navigationsgerät ausgestattet sein werden, bis zum Jahr 2020 mit einer Marktdurchdringung von 87 % gerechnet (dies inkludiert allerdings auch Smartphones, die für die Navigation verwendet werden), siehe GSA (2010, S. 11).



## LBS

Eine strukturierte Gliederung von LBS ist nahezu unmöglich geworden, da die Zahl der LBS-Anwendungen fast ohne Ende ist. Wie kann man LBS definieren? Wenn neben den Koordinaten weitere Informationen im Sinn von Attributen zur Verfügung gestellt werden, spricht man von LBS. Beispiele: Wo ist die nächste Bank, der nächste Arzt, das nächste Restaurant mit vegetarischen Speisen? Anwendungen ohne Ende, die durch den Mobiltelefonmarkt einen unglaublichen Zuwachs erlebt haben. Bei den sogenannten Apps (also Applications oder Anwendungen) nehmen die LBS-bezogenen eine dominante Rolle ein. So bezog sich in Großbritannien, Frankreich und Deutschland jeweils die Hälfte der am häufigsten verkauften Anwendungen für ein bestimmtes Mobiltelefon auf LBS. Wenn man daher den Markt von LBS studiert, geht das Hand in Hand mit der Marktdurchdringung der GNSS-basierten Mobiltelefone, die weltweit bis 2020 eine Marktdurchdringung von 65 % erreicht haben werden. Für die Europäische Union erwartet man bis zu diesem Jahr eine Marktdurchdringung von rund 97 %, siehe GSA (2012, S. 19).

## Landwirtschaft

In der GSA-Studie werden für die Landwirtschaft zwei Kategorien unterschieden. Für die eine werden Genauigkeiten von etwa 1 m benötigt. Diese Genauigkeit kann in Europa z.B. mit EGNOS erreicht werden und genügt für den Getreideanbau sowie damit verbundenes Düngen und Ernten. Bei der zweiten Kategorie werden Zentimeter-Genauigkeiten benötigt wie etwa beim Kartoffel- und Gemüseanbau sowie der entsprechenden Aussaat. Um diese Genauigkeiten zu erreichen, muss entweder Precise DGPS (Differential GPS) oder Real-Time Kinematic verwendet werden. Von einem niedrigen Niveau ausgehend, wird in der EU bis 2020 mit einer Marktdurchdringung bei Traktoren mit GNSS-Ausrüstung von 33 % gerechnet, siehe GSA (2010, S. 29).

## Vermessung

Über GNSS in der Vermessung, noch dazu in der Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement zu berichten, hieße wohl Eulen nach Athen tragen. In GSA (2012, S. 33) wird in der Überschrift sehr richtig festgehalten: »Surveying sector is the early GNSS adopter.«

## Luftfahrt

Hier muss zwischen der kommerziellen und der allgemeinen Luftfahrt (umfasst Freizeit, private Geschäftsflüge, Bild- und Vermessungsflüge, etc.) unterschieden werden, da für die kommerzielle Luftfahrt ganz andere Anforderungen vorherrschen. GNSS-basierte Navigation kann hervorragend en-route und für das Anfliegen von Flughäfen zusätzlich zu den traditionellen Systemen eingesetzt werden. Für das Landen jedoch sind jedenfalls zusätzliche Ausrüstungen notwendig wie z.B.

SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems). In Europa gibt es mit dem SESAR (Single European Sky ATM Research)-Programm eine interessante Entwicklung, die darauf abzielt, ab 2020 GNSS als das Hauptmesssystem für alle Flugphasen einzusetzen, wobei GNSS auch SBAS – in Europa z.B. EGNOS – inkludiert. Hier taucht wiederum die besondere Bedeutung des Jahres 2020 auf, die schon bei der Beschreibung von Galileo und der anderen globalen Satellitennavigationssysteme hervorgehoben wurde. In der Luftfahrt rechnet man weltweit bis 2020 mit einer GNSS-Marktdurchdringung in Flugzeugen von 75 %, siehe GSA (2010, S. 23).

## Maritime Anwendungen

In GSA (2012) werden nur die Schiffe, die als Handelsschiffe unterwegs sind, betrachtet, obwohl gerade für die Freizeitkategorie »Millionen von Geräten« jährlich verkauft werden. Besonders in Küstennähe sind maritime GNSS-Anwendungen schon seit längerem etabliert. Attraktiv ist die Kombination von elektronischen Karten mit GNSS oder als Teil des AIS (Automatic Identification System). Aus der Sicht von Galileo ist besonders die Verbesserung des bestehenden Search and Rescue Systems COSPAS-SARSAT von Interesse.

Wie werden sich die in Aussage 1 angesprochenen 160 Billionen Euro im Jahr 2020 verteilen? Wenn man den Umsatz (aus dem Jahr 2009) der derzeit 15 wichtigsten GNSS-bezogenen Firmen nimmt, dann lautet heute die Verteilung wie in Aussage 2 formuliert:

### Aussage 2:

Aus heutiger Sicht teilen sich die weltweiten GNSS-Marktanteile folgendermaßen auf: USA 30 %, EU 20 %, Japan 15 %, Rest 35 %, siehe GSA (2010, S. 6).

Wie die Marktverteilung in zehn Jahren aussieht, kann damit nicht abgeschätzt werden. Galileo wird jedenfalls eine signifikante Auswirkung haben. Und es bleibt zu hoffen, dass sich mit Galileo vor allem der europäische Marktanteil weiter erhöht, obwohl er schon heute erstaunlich hoch ist.

In Europa werden die Verkaufszahlen von GNSS-Geräten bis etwa 2016 stark ansteigen und sich dann auf einem Niveau von etwa 200 Millionen Einheiten pro Jahr stabilisieren, wobei die Erwartungen für die Marktdurchdringung enorm sind: so werden für drei der Hauptmarkt-komponenten, nämlich Straßenanwendungen, LBS und Luftfahrt, im Jahr 2020 nahezu Marktsättigungen erwartet. Bei der Landwirtschaft rechnet man bezogen auf die Jahre 2010 bis 2020 mit einer Verdoppelung der Marktdurchdringung auf 33 %. Eine Kurzzusammenfassung dieses Absatzes lautet:

### Aussage 3:

Ab dem Jahr 2016 wird sich in der EU die Anzahl der jährlich verkauften GNSS-Geräte bei etwa 200 Millionen stabilisieren.

In GSA (2010, 2012) gibt es zahlreiche weitere Detailanalysen untermalt mit anschaulichen Grafiken. Für alle gibt es einen Grundtenor: der GNSS-Markt wird wachsen. Aus ökonomischer Sicht wäre es sehr nachlässig, hier nicht mitzumachen und den Markt anderen zu überlassen.

## 5 Zusammenfassung – Kommt Galileo zu spät?

Darf dem Leser eine Frage gestellt werden? Aus dem bisher Gesagten, wie würden Sie antworten, wenn Sie gefragt werden, ob Galileo zu spät kommt?

Wie gezeigt wurde, wird das Jahr 2020 ein Schlüsseljahr, da bestehende globale Satellitennavigationssysteme wie GPS und GLONASS mit diesem Jahr ihre Modernisierungen abgeschlossen haben werden und das chinesische Compass neu am Markt sein wird. Wenn es Europa gelingt, die Weiterentwicklung von Galileo zügig voranzutreiben und FOC für Galileo spätestens in diesem Jahr zu erreichen, dann kommt allein aus dieser Perspektive Galileo noch rechtzeitig, um am Wettbewerb um den Markt teilnehmen zu können.

Wie ebenfalls gezeigt wurde, wird sich der weltweite GNSS-Markt von 2012 bis 2020 mehr als verdoppeln und dann stark abflachen. Bis 2020 wird somit der Markt primär von GPS dominiert werden, allenfalls spielt GLONASS eine Rolle (vielleicht auch in Kombination mit GPS). Für diesen großen Marktanteil kommt Galileo zu spät, da FOC erst etwa 2020 erreicht sein wird. Nach diesem Jahr wird, wenn die Marktprognose zutrifft, der Markt insgesamt kleiner und zudem wird mit Compass ein weiterer Mitbewerber auf der Anbieterseite existieren. Das Angebot wird steigen, und die Nachfrage wird sinken, Qualität und Preis werden eine entscheidende Rolle spielen. Es wäre nicht seriös, hier eine Aussage zu treffen, ob Galileo reüssieren können wird.

Jedenfalls kommt Galileo rechtzeitig, um mit anderen Systemen kombiniert zu werden. Wie in Abb. 5 gezeigt wurde, gibt es in topografisch anspruchsvollem Gelände und in städtischen Bereichen vielfach das Problem der Abschattungen, das den Einsatz von einem Satellitennavigationssystem allein unmöglich macht, weil nicht ausreichend viele Satelliten simultan beobachtet werden können. Durch das Kombinieren von beispielsweise GPS und Galileo werden diese Probleme weitestgehend eliminiert. Allerdings muss auf die Gegenwaagschale gelegt werden, dass die Kombinationen auch ohne Galileo, also etwa mit GPS, GLONASS und Compass möglich sind.

Auf Anregung eines Gutachtens zu diesem Artikel soll auch noch auf die fundamentale Bedeutung der Geodäsie im Zusammenhang mit GNSS hingewiesen werden. Das ist zwar nicht Galileo-spezifisch, kann aber allgemein auf GNSS bezogen werden. Die Beiträge reichen »von der Quelle bis zur Mündung«, aus der Sicht einer Messung vom Verstehen der Messung, von der Analyse der (Fehler-)Einflüsse in der Satellitenbahn, in der Ionosphäre,

in der Troposphäre im Empfänger bis insbesondere zur Modellbildung. Das Verstehen der verschiedenen Koordinatensysteme (raumfest, erdfest, geozentrisch, lokal), der Zeitsysteme, der Ausgleichung von redundanten Messgrößen ist ohne die Geodäsie nicht denkbar. Auch in Zukunft, wenn die Systeme miteinander kombiniert werden und wiederum verschiedene Koordinaten- und Zeitsysteme verstanden werden müssen, wird die Geodäsie viele wertvolle Beiträge leisten können.

Auch wichtig ist eine Antwort auf die Frage, ob Galileo halten wird, was es versprochen hat. Es war nicht leicht, die europäische Politik von der Notwendigkeit eines eigenen Satellitennavigationssystems zu überzeugen. Unabhängigkeit von einem militärischen Betreiber, ein System unter ziviler Kontrolle, bessere Signale, bessere Genauigkeit, eine große Zahl von Arbeitsplätzen waren Schlüsselargumente. Aus der Sicht des Jahres 2020 werden einige dieser Argumente keine Gültigkeit mehr haben, da die anderen Systeme durch die Modernisierungen nachgerüstet haben werden. Trotzdem, Galileo hat seine Berechtigung, weil Europa aus technologischer Sicht nicht nur zuschauen und den Markt anderen überlassen darf.

Zurück zur Frage, ob Galileo zu spät kommt. Eines kann mit Sicherheit gesagt werden: Der Markt wartet nicht auf Galileo! Es muss schon Galileo »zum Markt« entwickelt werden. Die Chance ist da, möge die Europäische Union sie nützen!

## Literatur

- Bauer, M.: Vermessung und Ortung mit Satelliten – Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme, 6. Auflage. Wichmann, Karlsruhe, 2011.
- Berglez, P.: Development of a multi-frequency software-based GNSS receiver. Dissertation, Technische Universität Graz, 2013.
- ESA: Draft Programme Proposal for the Extension of the European GNSS Evolution Programme (2013–2015). ESA/PB-NAV (2011) 24 rev.1. 20 February 2012.
- GSA (European GNSS Agency): GNSS Market Report, Issue 1, 2010. Verfügbar unter [www.gsa.europa.eu](http://www.gsa.europa.eu).
- GSA (European GNSS Agency): GNSS Market Report, Issue 2, 2012. Verfügbar unter [www.gsa.europa.eu](http://www.gsa.europa.eu).
- Hofmann-Wellenhof, B.: Wozu brauchen wir Galileo? Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, 100(1): S. 36–43, 2012.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E.: GNSS – Global Navigation Satellite Systems – GPS, GLONASS, Galileo & more, Springer-Verlag, Wien New York, 2008.
- Institute of Navigation: GNSS program updates. The Quarterly Newsletter of The Institute of Navigation, 22(2): pp. 14–19, 2012.

## Anschrift des Autors

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr. h. c. mult. Bernhard Hofmann-Wellenhof  
Technische Universität Graz, Institut für Navigation  
Steyrergasse 30, 8010 Graz, Österreich  
[hofmann-wellenhof@tugraz.at](mailto:hofmann-wellenhof@tugraz.at)