

# Das Europäische Satelliten-navigationsystem GALILEO



*Bärbel Deisting, Bernd Eissfeller*

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird – nach einer kurzen Darstellung der bisherigen Historie – eine Übersicht über den momentanen Projektstatus des Satellitennavigations-systems GALILEO gegeben. Im Anschluss hieran findet der Leser eine technische Diskussion, die stark auf das Nutzersegment konzentriert ist. Diese beginnt mit einer Beschreibung der gegenwärtigen GALILEO Architektur (Raumsegment, Bodensegment, Nutzersegment), wobei die Besonderheiten gegenüber dem amerikanischen GPS System herausgearbeitet werden. Die Darstellung des Nutzersegmentes befasst sich zunächst mit der aktuellen GALILEO Signalstruktur. Anschließend werden besondere technische Herausforderungen bei der Entwicklung von GALILEO Endgeräten besprochen.

## 1 Einleitung

Basierend auf der Kommunikation [1] der Europäischen Kommission vom 9. Februar 1999 (»GALILEO Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services«) wird in Europa gegenwärtig das Satellitennavigations-system GALILEO entwickelt. Einerseits soll damit die Unabhängigkeit von GPS bzw. eine effektive Ergänzung erreicht werden. Andererseits soll hiermit auch die Fähigkeit Europas erheblich verbessert werden, sich auf dem Welt-Markt für Satellitennavigation und den damit zusammenhängenden Anwendungen und Diensten einen gewichtigen Marktanteil zu sichern. Die strategische und wirtschaftliche Bedeutung von GALILEO für Europa ist unumstritten. Dies wurde auf mehreren Tagungen des Europäischen Rates, z. B. Laeken am 14. und 15. Dezember 2001 (Tagesordnungspunkt 33), immer wieder bestätigt [2]. Obwohl der politische Wille zum Aufbau von GALILEO vorhanden ist, gingen die Meinungen der Mitgliedsländer über die Finanzierung des Programms teilweise auseinander, insbesondere was die Beiträge des privaten Sektors zu den Entwicklungskosten betrifft (Public-Private-Partnership). Dieser Konflikt verwundert hier etwas, da

GALILEO für europäische Maßstäbe mit Errichtungskosten von 3,2 Mrd. € (das sind die Kosten für 150 km Autobahnneubau), die zudem noch über 8–10 Jahre aufzubringen sind, nicht teuer ist, aber ohne Frage ein Beitrag zur Lösung der wirtschaftlichen Strukturprobleme in Europa darstellt. Derzeitige Schätzungen gehen davon aus, dass GALILEO zur Schaffung bzw. Sicherung von 100.000 Arbeitsplätzen führt, und dass der mit GALILEO verbundene Dienstleistungs- und Endgerätemarkt mit rd. 9 Mrd. € pro Jahr angenommen werden kann. Unabhängige Abschätzungen der wirtschaftlichen Rentabilität von GALILEO zeigen ein Nutzen-/Kostenverhältnis von etwa 4,6 an, was bei Infrastrukturprojekten als sehr guter Wert gilt.

## **2 Status**

GALILEO ist ein Großprojekt, das in Zusammenarbeit von Organen der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) durchgeführt wird. Seit Juni 2003 hat das gemeinsame Unternehmen (Galileo Joint Undertaking oder GJU) mit Sitz in Brüssel die Verantwortung für die GALILEO Realisierung übernommen. GALILEO soll prinzipiell in drei Phasen (Definition, Entwicklung, Errichtung) realisiert werden. Nach einer Definitionsphase, die im Jahr 1999 mit einer grundlegenden Systemstudie [3] begonnen (»Comparative System Study«) wurde, läuft seit Dezember 2003 die Vorentwicklungsphase C0. Wichtig für GALILEO war das Jahr 2000, in dem eine Serie von Detailstudien für insgesamt 100 Mio € durchgeführt wurden. Besonders hervorzuheben sind hier die Architekturstudie GALA (beauftragt von der EC) und die GalileoSat Studie [4] zur Definition des Raumsegmentes (beauftragt von der ESA). Ziel sämtlicher Studien war es, dem Rat der Verkehrsminister am 22.12.00 die erforderlichen Entscheidungshilfen zur Verfügung zu stellen, um ein positives Votum für die Entwicklungsphase zu erhalten. Eine positive Entscheidung des Rates der Verkehrsminister wurde erwartet, aber dann aus mehreren Gründen verschoben auf April 2001 (Konsolidierung der Finanzierung, Implementierung des Public Private Partnership PPP bis 2003, Aufbau einer Organisationsstruktur, Intensivierung der Verhandlungen mit USA und Russland). Auch bei dem Treffen der Verkehrsminister im April 2001 wurde keine weitergehende Entscheidung getroffen. Da der kritische Punkt des GALILEO Projektes weniger die Technik darstellt, sondern vielmehr die Finanzierung, zumal aus dem Bereich des privaten Sektors ursprünglich nicht mehr als 200 Mio. € zugesagt waren, wurde ein Konsortium, das von Price Waterhouse Coopers (PWC) geführt wurde [5], von der EU beauftragt, unabhängig das Projekt GALILEO im Rahmen einer Kosten/Nutzenanalyse erneut zu bewerten und einen Geschäftsplan zu entwickeln. Die grundlegende Aussage der Studie, deren Resultate zu Ende 2001 veröffentlicht wurden, bestand darin, dass die öffentliche Hand deutlich länger Mittel bereitstellen muss (bis in die Anfangsphase des Betriebes hinein), bis ein höherer

Beitrag des Privatsektors greifen kann. Einige Regierungen baten aufgrund der PWC Studie um eine Denkpause, so dass auch zum Jahresende 2001 keine Entscheidung getroffen werden konnte [6]. Nach vielen nationalen Diskussionen [7] gab dann der Europäische Verkehrsministerrat am 26.03.02 grünes Licht für den Aufbau von GALILEO. Allerdings trat das Projekt von März 2003 bis März 2004 auf der Stelle, da sich zum einen Deutschland und Italien nicht über die industrielle Führung einigen konnten. Zum anderen haben einige Europäische Länder das GALILEO Programm überzeichnet (eine zu großen Beitrag zugesagt), was zu zeitaufwendigen Verhandlungen bei den Budgetanpassungen führte. Beide Problembereiche konnten beim Verkehrsministerrat am 28.03.2003 aufgelöst werden, mit den Resultaten, dass Deutschland die Systemführung erhalten hat und auch der Sitz von Galileo Industries nach München verlegt werden soll. In dem Treffen wurden auch die Anteile wie folgt festgelegt: Deutschland 20,9 %, Italien 15,2 %, Frankreich 17,0 %, Großbritannien 16,0 %, Spanien 10,1 % und Belgien 5,8 %.

Seit Oktober 2003 läuft der Auswahlprozess für den Konzessionär. Im Februar 2004 kamen drei Konsortien in die zweite Runde der Vergabe um die Galileo Konzession, dies waren neben dem iNavSat Konsortium, in dem sich EADS, Inmarsat und Thales zusammengeschlossen hatten, ein Konsortium, unter anderem bestehend aus Alcatel, Finmeccanica und Vinci Concessions, sowie das Eutelsat Konsortium mit den Firmen Eutelsat, Hispasat, LogicaCMG und AENA.

Dem vorausgegangen war die Ausschreibung des Verfahrens zur Vergabe der Konzession für den Betrieb des europäischen Satellitennavigationssystems. Das Verfahren bestand aus zwei Teilen, einer Vorauswahl und daran anschließend einer sogenannten »wettbewerbsorientierten« Verhandlungsphase. Die Konzessionsvergabe betrifft die Errichtungsphase des Systems, welche für den Zeitraum 2006/2007 geplant war und zu der neben dem Aufbau der Bodenstationen auch der Start der insgesamt 30 Satelliten gehört sowie die daran anschließende Betriebsphase. Durch den Konzessionsvertrag wird der Konzessionsnehmer zur Durchführung der beiden Phasen verpflichtet. Im Februar 2004 wurde die erste Etappe abgeschlossen. Im zweiten Schritt nahm das **Galileo Joint Undertaking (GJU)** Verhandlungen mit den Konsortien auf, die in die engere Wahl gelangten.

Das Eutelsat Konsortium zog sich zurück und so befanden sich im März 2005 noch zwei Konsortien in der Auswahl; Eurely, bestehend aus Alcatel, Finmeccanica, AENA und Hispasat sowie das Inavsat Konsortium. Das GJU teilte im März 2005 mit, dass die Unterschiede in den Angeboten minimal seien und eine Entscheidung mit wem Schlussverhandlungen geführt werden erst in 3 Monaten erfolgen werde. In dieser Zeit werde es parallele Verhandlungen mit beiden

Konsortien geben [22]. Im Mai kündigten die beiden Konsortien eine mögliche Fusion an und legten dem GJU am 20 Juni einen gemeinsamen Vorschlag vor. Am 27. Juni lautete die Antwort aus Brüssel, dass beide gemeinsam als Konzessionäre für den Bau und Betrieb von GALILEO verantwortlich sein sollen und die weiteren Vertragsverhandlungen auf Basis des gemeinsamen Vorschlags geführt werden.

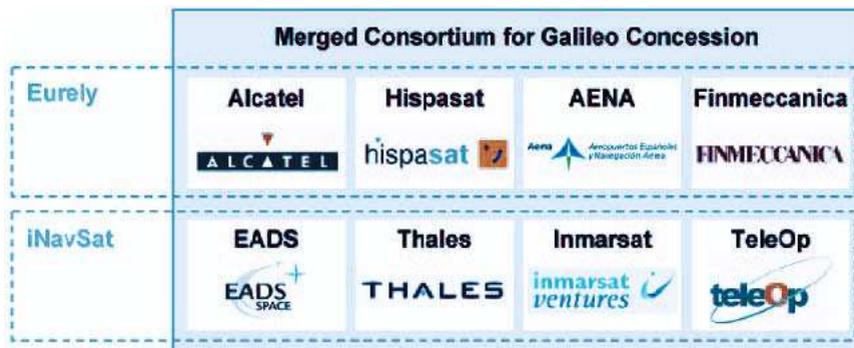


Bild 1: Übersicht über die Partner des fusionierten Konsortiums

Im Oktober 2005 wurde ein Angebot des fusionierten Konsortiums abgegeben und im Dezember 2005 wurde in Brüssel ein Abkommen zwischen den Partnern über die Galileo Konzession unterzeichnet, das folgende Punkte enthielt [23]:

- Hauptsitz des Galileo Konzessionärs in Toulouse
- Hauptsitz der Galileo Betreibergesellschaft in London
- Galileo Kontrollzentren (GCC) in Oberpfaffenhofen und Fucino
- Performance Evaluation Centres in Oberpfaffenhofen und Fucino
- Safety of Life Centre und GCS in Spanien
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) wird Hauptauftragnehmer für Arbeiten in der IOV-Phase

Anfang 2006 gab es eine entscheidende Verhandlungsphase, in der am 17. Februar 2006 eine Grundsatzvereinbarung zwischen dem Galileo Joint Undertaking und dem fusionierten Konsortium unterzeichnet wurde. Der Abschluss des Vertrags ist für das Jahr 2007 vorgesehen.

Das GJU, welches für die Verhandlungen über die Galileo Konzession zuständig war, soll Ende des Jahres 2006 aufgelöst werden. Dessen Aufgaben sollen auf die bereits 2005 gegründete **GNSS Supervisory Authority** übergehen. Deren Hauptaufgaben sind neben der Vertretung der Interessen der Öffentlichkeit im Zusammenhang mit den europäischen GNSS-Satellitennavigationsprogrammen und die Tätigkeit einer Regulierungsbehörde.

Nach dem Stand der derzeitigen Planungen sollen die Entwicklungs- und Validierungsphase (In Orbit Validation) 48 Monate dauern, die Errichtungsphase 24 Monate, daran schließt sich eine Betriebsphase von 20 Jahren an. *Bild 2* zeigt den vorgesehenen zeitlichen Rahmen sowie die jeweiligen Verantwortlichkeiten. Die aktuelle zeitliche Planung sieht eine Dauer der Entwicklungs- und Validierungsphase bis Anfang 2009 vor. Die daran anschließende Errichtungsphase ist für den Zeitraum von 2009–2010 geplant. Der Anfang der Betriebsphase, die auf eine Dauer von 20 Jahren angelegt ist, soll 2010 beginnen [24].



Im Rahmen der Entwicklungsphase sollten zwei Experimentalsatelliten gestartet werden. Im November 2005 wurde der erste Galileo Satellit, der vom Unternehmen **Surrey Satellite Technology Limited (SSTL)** gebaut worden war, auf den Namen GIOVE-A (Galileo In Orbit Validation Element) getauft. Er war bereits im Juli 2005 an die ESA geliefert worden und wurde am 28. Dezember an Bord einer Sojus-Trägerrakete vom Raumfahrtzentrum Baikonur ins Weltall transportiert. Am 10. Januar nahm das SSTL Missionskontrollzentrum die Nutzlasterprobung in Angriff und am 12. Januar 2006 wurde der Empfang der ersten Signale gemeldet. GIOVE-A besitzt eine Masse von 600kg und eine Abmessung von 1,3 x 1,3 x 1,4 m<sup>3</sup> [20]. Diesem Satelliten sollte Anfang 2006 ein Zweiter von **Galileo Industries** gebauter folgen. Der Zweite, GIOVE-B genannte Satellit, wird eine Masse von 523 kg, eine Primärleistung von 943 kW und eine Abmessung von 0,955 x 0,955 x 2,4 m<sup>3</sup> besitzen. Der Start dieses Satelliten wird sich jedoch verzögern und könnte erst im Zeitraum September bis November 2006 erfolgen.



*Bild 3:*  
Start von GIOVE-A

Die Hauptaufgaben von GIOVE-A und -B waren zum einen die Sicherung der von der **Internationalen Fernmeldeunion (ITU)** zugewiesenen Frequenzen, zum anderen sollten sie die für die Konstellation der GALILEO-Satelliten erforderlichen Messwerte liefern sowie kritische neue Technologien, wie z. B. Atomuhren, Bordinstrumente, Signalgeber und Empfänger, testen. Für GIOVE-A wurde ein spezielles Bodensegment eingerichtet, welches eine experimentelle Präzisionszeitgeberstation beinhaltet und neben einem weltweiten Netz von Sensorstationen für die Erfassung der Galileo Daten, ein Rechenzentrum im Europäischen Raumforschungs- und Technologiezentrum der ESA in den Niederlanden umfasst [21].

2008 sollen dann die ersten vier voll betriebsfähigen Satelliten folgen. Ein Vertrag über € 950 Millionen für die Entwicklung und den Aufbau dieser vier wurde Anfang Januar 2006 von der ESA und Galileo Industries unterzeichnet.

Einen weiteren wichtigen Schritt in der Entwicklung des Satellitennavigationssystems GALILEO stellten die Verhandlungen der EU mit den USA über die gemeinsame Nutzung von Frequenzen von GPS und GALILEO dar. Diese konnten im Juni 2004 erfolgreich abgeschlossen werden.

### **3 Architektur**

Die wesentlichen Eigenschaften der GALILEO Systemarchitektur lassen sich wie folgt [9] zusammenfassen:

- Unabhängigkeit von anderen Systemen der Satellitennavigation
- Interoperabel mit GPS (GLONASS)
- Dienstkonzept (offen, kommerziell, sicherheitskritisch, reguliert)
- Implementierung eines Integrity Dienstes (in Europa /außerhalb Europas)
- Unabhängigkeit des Integrity Dienstes vom Galileo Kontrollsystem (GCS)
- Weltweite Dienste (SAR und navigationsdatenbezogene Dienste)
- Globale Ortung und Zeitverteilung auf Grundlage einer globalen Konstellation
- Regionale Komponenten (Monitorstationen und Up-Link Stationen)
- Integration mit regionalen Systemen (z. B. EGNOS)
- Integration mit lokalem (Differential u. a.) Systemen
- Kompatibel mit zukünftigen Mobilfunknetzen (UMTS)

Man erkennt aus *Bild 4*, dass die wesentliche Erweiterung von GALILEO gegenüber GPS in der Implementierung eines globalen/regionalen Segmentes zur Überwachung der Integrität besteht. Zielsetzung ist die Unterstützung der sicherheitskritischen Navigation der Luftfahrt (Landeinflug CAT I) sowie der Or-

tung und Führung von Zügen (Train Control) im schienen-gebundenen Landverkehr.

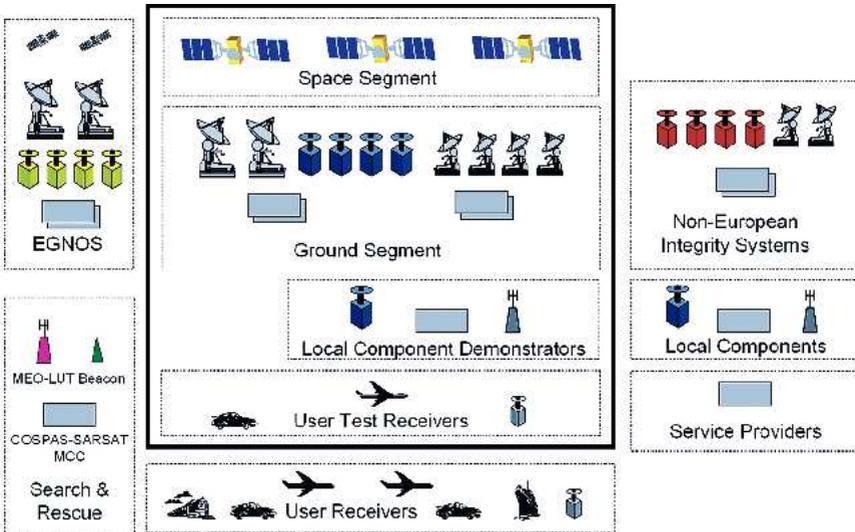


Bild 4: Übersicht über die GALILEO Systemarchitektur

### 3.1 Raumsegment

Das Raumsegment [10] von GALILEO soll sich insgesamt aus 30 MEO (Mean Earth Orbiting) Satelliten aufbauen, die als Walker 27/3/1 (+ 3 Ersatzsatelliten) Konstellation konfiguriert sind, d.h. auf drei Bahnebenen (Bild 5b) verteilt sind. Die Bahnhöhe beträgt 23.616 km und die Neigung der Bahnebene  $56^\circ$ . Das Satellitendesign (Bild 5a) basiert auf bereits durchgeführten Vorläuferprogrammen (z.B. GLOBALSTAR) inklusive kritischer Nutzlasttechnologien, die bereits in begleitenden ESA Programmen entwickelt werden. Der GALILEO Satellit hat eine Masse von 625 kg, generiert eine Primärleistung von 1500 W und fällt mit linearen Abmessungen von  $2.7 \times 1.2 \times 1.1 \text{ m}^3$  in die Kategorie von Minisatelliten. Der Satellit besitzt sämtliche Standardsysteme zur Bahn- und Lagekontrolle, Thermalkontrolle usw. Hervorzuheben, im Gegensatz zu GPS, ist die Integration eines Laser Retroreflektors, um die Bahnbestimmung auch mit Laserentfernungsmessungen zu stützen.

Das Herzstück des GALILEO Satelliten stellt die Navigationsnutzlast dar. Bei der Nutzlast handelt es sich um einen regenerativen Transponder, bei dem moderne Digital- und Halbleitertechnik eingesetzt wird. Die Nutzlast baut sich aus

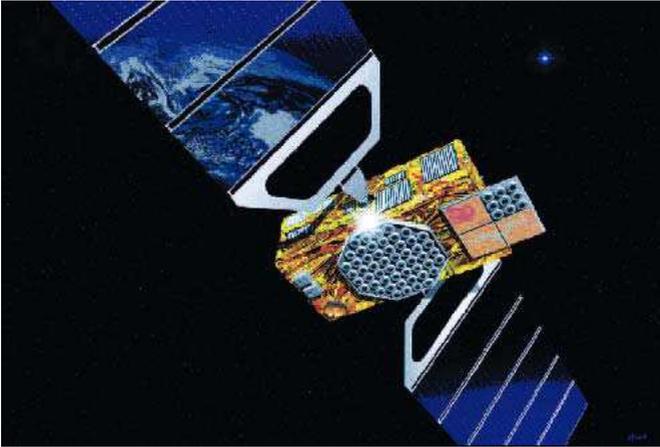


Bild 5a: GALILEO Satellit

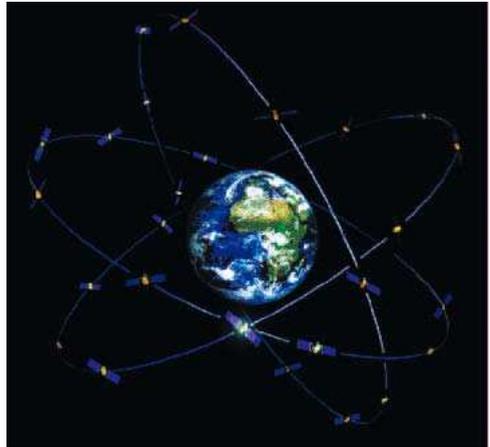


Bild 5b:  
GALILEO Raumsegment

Atomuhren (Clock Monitoring und Control Unit), dem Signalgenerator (Navigation Signal Generation Unit) mit Rechereinheit, dem Frequenzgenerator (FPGU), dem Endverstärker (Solid State Power Amplifier) und der L-Band Antenne auf. Als Atomuhren sollen zwei Rubidiumstandards ( $5 \cdot 10^{-13}$  über 100 s) und zwei Wasserstoffmaser ( $5 \cdot 10^{-14}$  über 10.000 s) eingesetzt werden.

### 3.2 Bodensegment

Wie bereits ausgeführt, baut sich das GALILEO Bodensegment [9] einmal aus dem Kontrollsegment für den Betrieb und die Bahn- und Zeitbestimmung (**GCS oder Ground Control Segment**) auf. Zum anderen besteht es aus dem System zur Überwachung der Integrität (**IDS oder Integrity Determination System**).

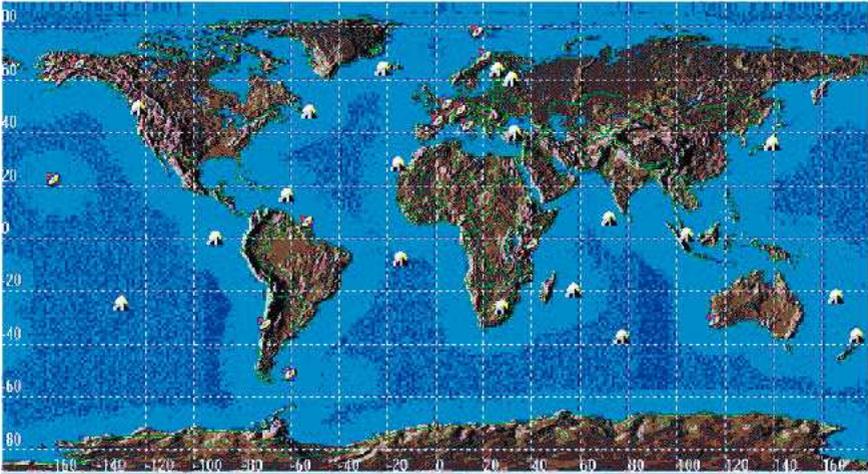


Bild 6: GALILEO Bodensegment (Beispiel)

Die Zahl der Elemente im GCS und IDS werden derzeit noch genauer in der Phase C0 bestimmt. Von der Größenordnung her gesehen setzt sich das GCS aus 18-20 Monitorstationen, 9 Up-Link Stationen, 5 TTC Stationen und zwei Kontrollzentren zusammen. Im europäischen Raum spielt die Integration mit dem EGNOS Bodensegment eine wichtige Rolle.

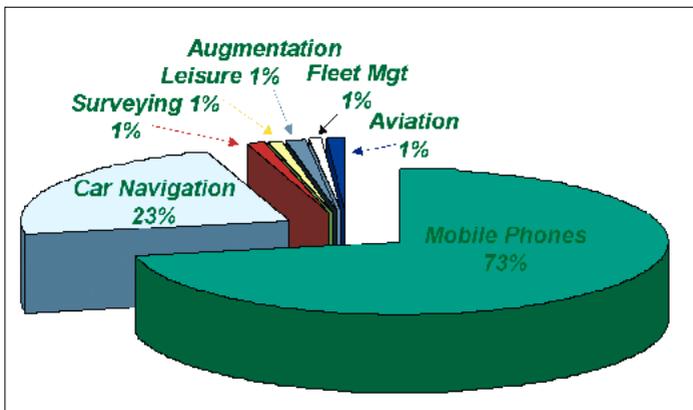


Bild 7: Vorhersage des Europäischen GNSS Marktes im Jahr 2005

### 3.3 Nutzersegment

Das GALILEO Nutzersegment setzt sich, vergleichbar zu GPS, aus allen Anwendern zu Wasser, auf dem Land, in der Luft und im Weltraum zusammen. In *Bild 7* erkennt man die vorhergesagten Anteile verschiedener Anwendungen am europäischen GNSS Markt (Marktgröße 8 Milliarden €) im Jahr 2005.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Anforderungen an die GALILEO Leistungsparameter (Maskenwinkel, Genauigkeit, Überdeckung, Verfügbarkeit, Integrität) für zwei (grundlegend) unterschiedliche Anwendungen. Die Anforderung für sicherheitskritische Anwendungen ist mit der Luftfahrtanforderung für den präzisen Landeanflug der CAT I identisch. Bei den Massenmarktanforderungen ist wichtig, dass diese für Maskenwinkel über 25° gelten sollen. Hierbei wird den besonderen Bedingungen der Landnavigation in bebauten Gebieten (Abschattungen, Multipath) Rechnung getragen.

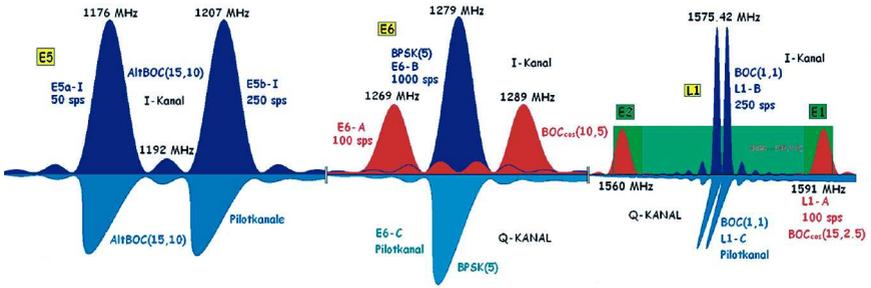
Tab. 1: Ausgewählte Anforderungen an GALILEO [10]

Parameter	Massenmarkt	Sicherheitskritisch
Maskenwinkel	25°	5°
Genauigkeit (95%)	10 m horizontal	4 m vertikal
Überdeckung	weltweit	weltweit
Verfügbarkeit	> 70%	> 99%
Integrität	nicht gefordert	zwingend (6 s, 10 <sup>-7</sup> )

### 3.4 Signale

Ein sehr wichtiges Thema aus der Sicht des Nutzers ist die Ausarbeitung einer innovativen Signalstruktur für das GALILEO System. Hierbei sind viele Randbedingungen zu beachten, z. B. noch vorhandene freie Bereiche auf der Frequenzachse des L-Bandes, die Größe der abgestrahlten Leistung, die Kompatibilität mit dem derzeitigen und dem zukünftigen GPS Signal und die Wahrung von militärischen Sicherheitsinteressen der NATO (NAWWAR). Der heutige Stand der Signaldefinition, wie sie durch die EU mit den USA vereinbart wurde, ist in *Bild 8* schematisch dargestellt (Stand: Juni, 2004):

Man sieht, dass bei GALILEO im Prinzip vier Frequenzbänder (siehe Tabelle zu *Bild 8*) für Signale verwendet werden sollen, nämlich im unteren L-Band E5a (überlagert mit GPS L5) und E5b von jeweils 24 MHz Bandbreite, im mitt-



Band / Signal	Carrier Frequency	Bandwidth	Minimum Reception Power	Typical $C/N_0$	Modulation	Chip Rate	Data Rate
E5a	1176,45 MHz	24 MHz	-155 dBW	50 dBHz	AltBOC(15,10)	10,23 Mcps	50 sps
E5b	1207,14 MHz	24 MHz	-155 dBW	50 dBHz	AltBOC(15,10)	10,23 Mcps	250 sps
E6	1278,75 MHz	40 MHz	-152 dBW	50 dBHz	BOC <sub>CSK</sub> (10,5)	5,115 Mcps	1000 sps
L1	1575,42 MHz	32,736 MHz	-152 dBW	45 dBHz	BOC(1,1)	1,023 Mcps	250 sps

**Bild 8:** Schematische Darstellung der Galileo Signaldefinition [11] sowie Tabelle der Trägerfrequenzen und Signalparameter

Im unteren L-Band E6 mit insgesamt 40 MHz Bandbreite und im oberen L-Band 32,7 MHz Bandbreite. Bewertet man die in *Bild 8* dargestellten Signale, so erkennt man, dass die Implementierbarkeit im unteren L-Band (E5a+E5b) sehr gut durchführbar ist. Die Verwendbarkeit von E6 ist fraglich, da in E6 z. B. militärische und zivile Radarsysteme koexistieren (kein geschütztes Band). Problemstelle ist das obere L-Band, da hier das GALILEO Signal einerseits mit dem GPS C/A-Kode, andererseits mit dem neuen Militärsignal (M-Kode) verträglich sein muss.

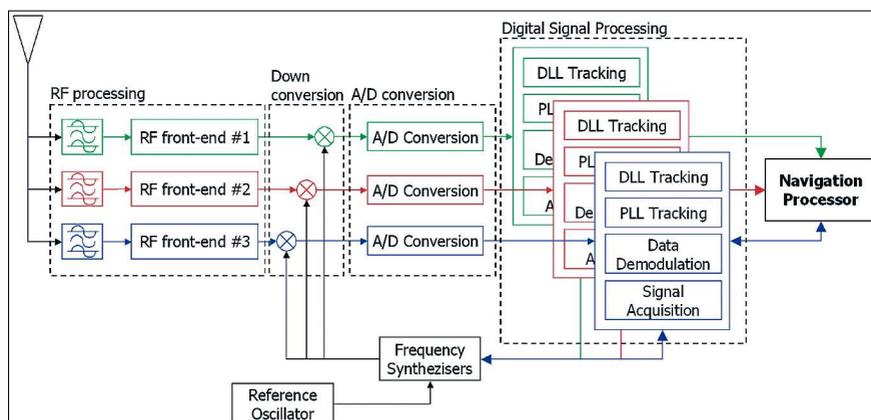
Wie aus *Bild 8* entnommen werden kann, sind grundsätzlich folgende Modulationsverfahren vorgesehen:

- BPSK(10): Binäre Phasenumtastung mit 10,23 MHz
- BPSK(5): Binäre Phasenumtastung mit 5,115 MHz
- BOC(1,1): Binary Offset Carrier (Chip-Rate 1,023 MHz, Unterträger 1,023 MHz). Dieses Verfahren wird auch Manchester Kodierung genannt.
- BOC(15,2,5): Binary Offset Carrier (Chip-Rate 2,5575 MHz, Unterträger 15,3450 MHz)
- BOC(10,5): Binary Offset Carrier (Chip-Rate 5,115 MHz, Unterträger mit 10,23 MHz)

Für alle Modulationen ist ein datenfreier Kanal (nur mit dem Spreizcode moduliert) als Q-Kanal (Pilotsignal) vorgesehen, während der um 90° gedrehte I-Kanal neben dem Spreizcode noch die Navigationsdaten enthält. Dies ist äquivalent zu einer QPSK Modulation. Die betrachteten Datenraten liegen bei 50, 250 und 1000 sps.

#### 4 GALILEO Endgeräte

In diesem Abschnitt soll so kurz wie möglich skizziert werden, wie die Struktur der GALILEO Endgeräte vermutlich aussieht und welche Besonderheiten, die sich aus der Signalstruktur ergeben, bei der Implementierung zu beachten sind. In *Bild 9* ist ein Blockdiagramm eines GALILEO Empfängers dargestellt.



*Bild 9:* Schematischer Aufbau eines GALILEO Empfängers

Die einzelnen Sub-Systeme:

- **RF-Front-End:** Für den Galileo Hochleistungsempfänger sind mindestens vier verschiedene Trägerfrequenzen vorzusehen (E5a, E5b, E6 und L1). Dieser Forderung muss bei der Auslegung der Antenne und im Aufbau des Front-Ends (Hardware) Rechnung getragen werden.
- **Frequenzumwandlung:** Durch die Mehrfrequenzproblematik muss ein geeigneter Frequenzplan für das Herabsetzen der Trägerfrequenz (Down-Conversion) erarbeitet werden, der eine gute Empfangsqualität aller Signale gewährleistet.
- **A/D Wandlung:** Je nach Frequenzplan müssen ein oder mehrere A/D-Wandler eingesetzt werden. Es wäre möglich, die verschiedenen Bänder auf

die gleiche Zwischenfrequenz zu konvertieren. Dadurch wäre nur ein einzelner A/D Wandler erforderlich. Hierdurch wird aber der Rauschpegel erhöht. Eine andere Möglichkeit wäre alle Bänder getrennt zu digitalisieren.

- **Digitale Signalverarbeitung:**

- Akquisition: Die Akquisition der BPSK-Signale kann auf konventionelle Weise erfolgen, d.h. wie bei GPS. Zur Akquisition der BOC-Signale muss ein neues Verfahren angewendet werden, das die Besonderheiten dieser Signalstruktur berücksichtigt.
- Nachführen von Kode durch einen Delay-Lock-Loop (DLL): Das »Tracking« der Kodes kann weitgehend so durchgeführt werden wie bei konventionellen GPS-Empfängern. Es sind jedoch Ergänzungen notwendig, um extreme BOC Signale, wie der BOC(15,2.5), stabil nachführen zu können (kleiner Linearbereich der S-Kurve, Mehrdeutigkeit der Autokorrelationsfunktion).
- Nachführen der Trägerphase durch einen Phase-Locked Loop (PLL): Die Einführung der Pilotsignale (ein datenloses Signal) erlaubt den Ersatz des Costas Regelkreises durch einen kohärenten PLL, der wesentlich stabiler ist.

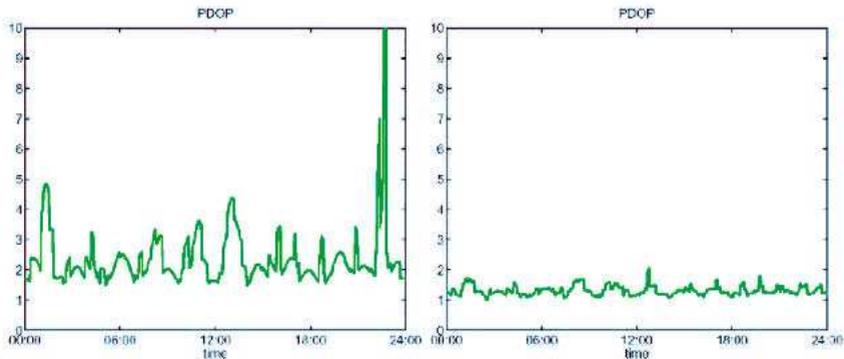
**Navigationberechnung:** Die Berechnung der Position anhand der Rohdaten kann prinzipiell wie bei GPS erfolgen. Es müssen allerdings die »Gruppenlaufzeiten« zwischen den Trägern berücksichtigt werden.

## 5 Kombination von GPS und GALILEO

Ein wesentlicher Vorteil, bspw. für die kinematische GNSS-Positionierung, wird sich aus der kombinierten Nutzung von GPS- und GALILEO-Signalen ergeben. Dabei wurde auch bereits deutlich, dass die Integration der beiden Systeme in einem Empfänger vergleichsweise einfach sein wird, denn GPS L1 und GALILEO L1 liegen auf identischen Zentralfrequenzen, ebenso wie GPS L5 und GALILEO E5a. Lediglich GPS L2 und GALILEO E6 weichen in ihren Frequenzen voneinander ab.

### 5.1 Verbesserte Geometrie

Der wesentliche Vorteil der Kombination der beiden Systeme liegt auf der Hand: Die Anzahl der gleichzeitig beobachteten Satelliten wird sich in etwa verdoppeln, was zu einer Reduktion des DOP-Faktors (»Dilution of Precision«) um eben bis zu einem Faktor von ca. 2 führen kann (homogene Verteilung der Satelliten vorausgesetzt). Die verbesserte Geometrie erlaubt somit eine erheblich präzisere Lösung. Selbst wenn keine neuen Algorithmen zur Positionier-



**Bild 10:** Beispiel für die Verbesserung des geometrisch bedingten Positionsfehlers (PDOP: position dilution of precision, bezieht sich auf 3D-Koordinate). Links die gegenwärtige Situation mit alleiniger Positionierung über GPS, rechts die Situation bei Positionsbestimmung mit GPS und GALILEO

ung entwickelt würden, ergäbe sich somit durch die gemeinsame Nutzung von GPS- und GALILEO-Messungen (auch lediglich im Zweifrequenz-Modus) eine deutliche Verbesserung.

Diese Tatsache macht sich unmittelbar in den erzielbaren Erfolgsraten bei der geometriebasierten Mehrdeutigkeitsfixierung bemerkbar, die bei kürzeren Basislinien sehr stark ansteigt; siehe dazu bspw. [12] und [13]. Bei längeren Basislinien verliert sich der Vorteil wegen der höheren Dominanz der atmosphärischen Refraktion, die nach wie vor ein Problem bleibt.

## **5.2 Fixierung mit Signalen auf drei Frequenzen**

Die Verfügbarkeit von mindestens drei Signalen eröffnet neue Möglichkeiten der geometriefreien Mehrdeutigkeitsbestimmung, die für die kinematische Positionierung hochgradig relevant sind. Das Konzept ist unter der Abkürzung TCAR (Triple Carrier Phase Ambiguity Resolution) bzw. allgemein MCAR (Multiple Carrier Phase Ambiguity Resolution) bekannt und kann kurz folgendermaßen zusammengefasst werden; siehe auch [16]: Zunächst wird zwischen den beiden Signalen, deren Frequenzen am engsten beieinander liegen, eine sog. »Super Wide Lane« (spezielle Linearkombination, die sich aus der Subtraktion der Phasen auf den zwei betrachteten Frequenzen ergibt) gebildet, die eine besonders hohe Wellenlänge aufweist und damit aus der Kombination von Strecken- und Trägerphasenmessungen sehr schnell – bei geringem

Mehrweg-Fehler sogar instantan – festgesetzt werden kann. Anschließend wird auf die »Wide Lane« übergegangen. Sind deren Mehrdeutigkeiten gelöst, erfolgt der letzte Schritt in Form der »Medium Wide Lane«. Konnten die Mehrdeutigkeiten all dieser Linearkombinationen bestimmt werden, so können die Mehrdeutigkeiten der Originalträgerwellen auf einfache Weise ermittelt werden.

Für GPS ergibt sich folgende Aufstellung; siehe auch [17]: Als »Super Wide Lane« käme  $L2-L5$  zur Anwendung mit einer virtuellen Wellenlänge von 5,86 m, gefolgt von der bisher bereits genutzten »Wide Lane«  $L1-L2$  mit der Wellenlänge von 0,86 m. Schließlich kann noch  $L1-L5$  mit einer Wellenlänge von 0,75 m gebildet werden. Auf Grund des höheren Rauschniveaus dieser Linearkombinationen im Vergleich zu den Originalsignalen kann in der Praxis nicht grundsätzlich mit einer instantanen Mehrdeutigkeitslösung gerechnet werden, aber es besteht die realistische Chance einer schnellen Lösung, ggf. auch über die Kombination geometriefreier mit geometriebasierten Methoden.

Im GALILEO-Fall kann von folgender Kaskade ausgegangen werden: Kann die »Super Wide Lane« nur über  $E6-E5a$  gebildet werden, so ergäbe sich eine virtuelle Wellenlänge von 2,93 m, bei Verwendung von  $E6-E5b$  immerhin 4,19 m. Die »Wide Lane« folgt mit  $L1-E6$  (Wellenlänge: 1,01 m) und die »Medium Wide Lane« schließlich mit  $L1-E5a$  (Wellenlänge: 0,75 m) bzw.  $L1-E5b$  (Wellenlänge: 0,81 m). Da zunächst nicht von einer kompletten Nutzung des  $E5ab$ -Breitbandsignals ausgegangen werden kann, gestaltet sich das Dreifrequenzverfahren mit GALILEO geringfügig ungünstiger als mit GPS. In jedem Fall ist die Nutzung des kommerziellen  $E6$ -Signals notwendig, wohingegen die GPS-Nutzung insgesamt unentgeltlich bleiben wird.

## **6 Abschließende Bemerkungen**

Die Entwicklung des weltraumbasierten Navigationssystems GALILEO stellt eine enorme technologische und finanzielle Herausforderung für Europa dar. Auf der anderen Seite ist jedoch eine erhebliche Steigerung der Leistungsparameter (Genauigkeit, Verfügbarkeit, Integrität, Kontinuität) der Satellitennavigation für fast alle Anwender zu erwarten. Viele Anwendungen von GPS, die zurzeit noch gewissen Beschränkungen unterliegen, werden in Zukunft durch zusätzliche GALILEO Satelliten wesentlich besser möglich sein als dies heute der Fall ist. Die kompatible Verwendung der  $L1$  Frequenz für GPS und GALILEO ist eine gute Nachricht für die Hersteller von Massenmarktempfängern, da beide Systeme mit gleicher Antenne und gleichem Front-End empfangen werden können. Unterschiede in den Signalen haben nur Auswirkungen auf den Digitalteil, was jedoch relativ unkritisch ist. Auch hochpräzise Anwendungen werden,

neben einer generell verbesserten Geometrie bei kombinierter Auswertung, durch Verwendung von 3 Signalen und mehr, von einer schnelleren bzw. robusteren Mehrdeutigkeitsfixierung profitieren, auch wenn das Problem der atmosphärischen Refraktion bestehen bleibt, regionale Netzwerke insofern also weiterhin von Bedeutung bleiben werden.

## **Literatur**

- [1] European Commission: Galileo, Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services, Communication 54, Brüssel, 9. Februar, 1999.
- [2] Belgian EU Presidency, European Council of Laeken: Presidency Conclusions, No. 33, Laeken, 14.-15. Dezember 2001.
- [3] Alenia, Alcatel, Dornier Satellitensysteme, Matra Marconi Space: GNSS-2 Comparative System Study, Final Presentation, Noordwijk, December 7th, 1999.
- [4] Alenia Spazio: GalileoSat Definition Study, Final Presentation, Noordwijk, March 22 th, 2001.
- [5] Price Waterhouse Coopers: Inception Study to Support Development and Business Plan for the GALILEO Programme, Executive Summary, TREN/B2/23-2001, 20 November, 2001.
- [6] Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Zwischenbericht über das Programm GALILEO, Faktenbericht auf Ersuchen des Rates (Verkehr) vom April 2001, Brüssel, 05.12.2001.
- [7] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Deutschland unterstützt die Entwicklung der europäischen Sattelitennavigation, Pressemitteilung, Nr.: 054/02, Berlin, 27. Februar 2002.
- [8] Europäische Kommission Generaldirektion Energie und Verkehr: GALILEO, Unverzichtbar für Europa, Information, Brüssel, 2001
- [9] Weber, T., Trautenberg, H. L., Schäfer, Chr.: Galileo System Architecture – Status and Concepts, Proceedings ION GPS 2001, Salt Lake City.
- [10] Benedicto, J., Dinwiddy, S. E. , Gatti, G., Lucas, R. Lugert, M., GALILEO : Satellite Design and Technology Developments, European Space Agency, Noordwijk, November 2000.
- [11] Hein. G.W., Godet, J., Issler, J.-L., Martin, J.-Chr., Lucas, R., Pratt, T., The GALILEO Frequency Structure and Signal Design, Proceedings ION GPS 2001, Salt Lake City.

- [12] Eissfeller, B., Tiberius, Chr., Pany, Th., Biberger, R., Heinrichs, G.: Real-Time Kinematic in the Light of GPS Modernization and Galileo, Proceedings ION GPS 2001, Salt Lake city.
- [13] Teunissen, P.: An Optimality Property of the Integer Least-Squares Estimator, J. Geod., Vol. 73, pp. 587-593.
- [14] Schüler, T., M. Irsigler, E. Krueger, and G. W. Hein: GALILEO - Das Satellitennavigationssystem Europas und sein Nutzen für die Hydrographie, Beiträge zum 64. DVW-Seminar und zum 20. Hydrographentag 2005, 6.-8. Juni 2005, Wilhelmshaven, Schriftenreihe des DVW, Band 47/2005, ISBN 3-89639-480-0, S. 81-103, Wißner-Verlag
- [15] Avila-Rodriguez, J.A., Hein, G. W., Irsigler, M. and Pany, T.: Combined Galileo/GPS Frequency and Signal Performance Analysis, Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2004, September 21-24, 2004, Long Beach, California
- [16] Forssell, B.; Martin-Neira, M.; Harris, R. A.: Carrier Phase Ambiguity Resolution in GNSS-2; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, S. 1727-1736
- [17] Werner, W.; Winkel, J. O.: TCAR and MCAR Options With Galileo and GPS; Proceedings of GPS ION 2003, 9.-12. September 2003, Portland, Oregon, USA, S. 790-800
- [18] Tjaden, J., GALILEO Information Workshop, Munich, 10. Februar 2006
- [19] Loddo, S., Status of European Satellite Navigation System Galileo Project, 21.-23. Februar 2006, Munich Satellite Navigation Summit 2006
- [20] Paffet, J., GIOVE-A The First Galileo Satellite In Space, 21.-23. Februar 2006, Munich Satellite Navigation Summit 2006
- [21] Europäische Kommission, Generaldirektion Energie und Verkehr, GALILEO auf Kurs - GIOVE-A-Satellit im Orbit, Pressemitteilung, IP/05/1712, Brüssel, 28. Dezember 2005
- [22] Galileo Joint Undertaking, Ongoing competition to obtain the Galileo concession : Galileo Joint Undertaking will start the negotiations on the concession contract with both consortia, Pressemitteilung, GJU/05/5313/HPM, Brüssel, 1. März 2005
- [23] Sassen, S., Galileo Concession and Current Status, 10. Januar 2006, Galileo Infotag, Bonn

[24] Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat, Stand des Programms GALILEO, KOM(2006) 272 endgültig, 7. Juni 2006, Brüssel

### **WWW-Links**

European Union: [www.europa.eu.int](http://www.europa.eu.int)  
European Space Agency: [www.esa.int](http://www.esa.int)  
Galileo: [ttp://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/galileo/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/index_de.htm)  
Galileo Joint Undertaking: [www.galileoju.com](http://www.galileoju.com)  
The White House: [www.whitehouse.gov/news/releases](http://www.whitehouse.gov/news/releases)

### **Photos/Bilder:**

*ESA, Galileo Joint Undertaking, SSTL, TeleOp GmbH*