



# → AUFBAU DER EUROPÄISCHEN NAVIGATIONSSATELLITEN- KONSTELLATION

Galileo In-Orbit Validation

## Der Namensgeber

Die Entwicklungsphase des europäischen Satellitennavigationssystems wurde nach dem berühmten italienischen Astronomen Galileo Galilei (1564–1642) benannt, der als Erster ein Teleskop auf den Himmel richtete. Seine Entdeckung der vier größten Jupitermonde erwies sich für die frühe Navigation als ungeheuer wertvoll: Ihre Orbitalbewegung konnte als weltweit sichtbare Himmelsuhr genutzt werden.



### Eine ESA Communications Produktion

September 2011

Autor S. Blair, EJR-Quartz

Produktionsredakteur K. Fletcher

Gestaltung Taa

ISBN 978-92-9221-044-1

ISSN 0250-1589

Copyright © 2011 European Space Agency

### Danksagungen

Vielen Dank für die Beiträge der ESA Galileo und GNSS Evolution Teams.

# AUFBAU DER EUROPÄISCHEN NAVIGATIONSSATELLITEN- KONSTELLATION

## Galileo In-Orbit Validation

### INHALT

<b>Europäische Satellitennavigation nimmt Form an</b> .....	2
<b>Vom Himmel geführt</b> .....	4
<b>Funktionsprinzip der Satellitennavigation</b> .....	6
<b>Europas erste Schritte</b> .....	8
<b>Anatomie eines Navigationssatelliten</b> .....	10
<b>Galileo am Boden</b> .....	12
<b>Heutige und zukünftige Dienste</b> .....	14
<b>Galileo IOV im Überblick</b> .....	16

# → EUROPÄISCHE SATELLITENNAVIGATION NIMMT FORM AN



Das erste Element des weltumspannenden europäischen Satellitennavigationssystems ist auf seinem Weg ins All. Zwei Sojus-Trägerraketen werden je zwei Satelliten auf eine Erdumlaufbahn bringen: die vier Galileo In-Orbit Validation (IOV) Satelliten, die den Kern der Gesamtkonstellation bilden. Galileo, eine gemeinsame Entwicklung von ESA und der Europäischen Kommission (EK), wird als zivil kontrollierter Dienst, der eine unterbrechungsfreie Verfügbarkeit garantiert, Nutzer weltweit mit hochwertigen Ortungs-, Navigations- und Zeitgebungsdiensten versorgen.

Jeder Satellit vereint die beste jemals im All für Navigationszwecke verwendete Atomuhr – mit einer Abweichung von lediglich einer Sekunde in drei Millionen Jahren – mit einem leistungsstarken Sender, um präzise Navigationsdaten auszu-

strahlen. Zur Unterstützung hat die ESA rund um den Globus ein entsprechendes Bodennetz aufgebaut.

Die ersten Satelliten werden zeigen, dass die Raum- und Bodensegmente viele der an Galileo gestellten Anforderungen erfüllen und bereits vor der Fertigstellung und dem Start der restlichen Satelliten die Auslegung des Systems validieren.

Diese ersten Satelliten sind voll repräsentativ für die weiteren, die ihnen in den Orbit folgen werden. Vierzehn weitere werden zusammen mit den ersten vier bis Mitte des Jahrzehnts für die anfängliche Funktionsfähigkeit (Initial Operational Capability – IOC) sorgen, die dann in der nachfolgenden Phase zur vollen Funktionsfähigkeit (Full Operational Capability – FOC) mit 30 Satelliten führen wird.



Test der ersten Galileo-Satelliten im Werk der Thales Alenia Space in Rom

## Sojus im CSG: Auslieferung der ersten Satelliten

Das erste Satellitenpaar ist die erste Nutzlast, die an Bord der russischen Sojus Trägerrakete von deren neuem Startkomplex auf dem Gelände des europäischen Weltraumbahnhofs in Französisch-Guayana (CSG: Centre Spatial Guyanaïs) ins All gebracht wird.

Diese dreistufige Rakete wird in der traditionellen russischen Vorgehensweise horizontal zusammgebaut und dann vertikal aufgerichtet, sodass ihre Nutzlast nach der europäischen Standardmethode von oben montiert werden kann. Ein neues mobiles Startgerüst unterstützt diesen Prozess und schützt gleichzeitig die Satelliten und das Trägersystem vor Umwelteinflüssen.

Eine europäische Aussetzvorrichtung (Dispenser) hält die Satelliten während der Startphase in Position und setzt sie dann auf ihrem endgültigen Orbit aus.

Es wird eine spezielle Version der Trägerrakete verwendet: eine leistungstärkere Sojus ST-B Variante und eine Fregat-MT Oberstufe, um die Satelliten auf ihre endgültige Umlaufbahn in 23.222 km Höhe zu bringen.

Die wiederzündbare Oberstufe Fregat wurde zuvor in ihrer Grundversion genutzt, um ESAs Experimentalsatelliten GIOVE-A und -B auszusetzen. Fregat-MT trägt 900 kg zusätzlichen Treibstoff mit sich.



Sojus im CSG

# → VOM HIMMEL GEFÜHRT

Das Grundkonzept von Galileo und anderen Satnav-Systemen ist denkbar einfach: Man stationiert viele hochpräzise Uhren im All und strahlt gemeinsam mit ihren Zeitsignalen ihre exakte Position aus. Jeder kann dann mithilfe eines Empfängers diese Signale kombinieren, um seine dreidimensionale Position auf der Erde zu erhalten. Zusätzlich dienen die Zeitstempel der Signale zur Synchronisierung globaler elektronischer Transaktionen wie Interbanken-Geschäfte, Telekommunikations- und Stromversorgungsnetze.

Satellitenavigation ist eine Hightech-Version einer uralten Technik. Genau wie wir, blickten auch unsere Vorfahren zum Himmel, um zu navigieren und die Zeit zu bestimmen. Die Phönizier verließen sich bei ihren Fahrten durchs Mittelmeer und rund um Afrika auf wenige Tausend mit dem bloßen Auge sichtbare Sterne. Auf der anderen Seite des Globus navigierten die Polynesier mithilfe der gleichen Himmelszeichen über Tausende Kilometer hinweg über den offenen Pazifik.

Die Astronomie selbst wurde geboren als Ägypten, Babylonien und andere landwirtschaftlich geprägte Staaten begannen,



Astronomische Uhr, Prag

## Meilensteine

1119 n. Chr.	1460	1610	1773	1817	1908	1942
						
Der chinesische Schreiber Zhu Yu erwähnt erstmals die Verwendung eines Kompasses für die Navigation auf See.	Der Quadrant, ein Werkzeug aus dem später der Sextant entwickelt wurde, wird erstmals in der Schifffahrt zur Bestimmung der geografischen Breite eingesetzt.	Galileo Galilei entdeckt die ersten vier Monde des Jupiter. Er erkennt, dass ihre Bewegung sie zu einer Art Uhr macht, die auf der ganzen Welt zu sehen ist, und nutzt sie, um die geografische Länge genauer festlegen zu können.	Mit seinem Schiffschronometer löst John Harrison das Problem der Längengradmessung auf See.	Johann von Bohnenberger konstruiert das erste Gyroskop.	Stahlschiffe verringern die Zuverlässigkeit traditioneller Kompass; erster Kreiselkompass entwickelt.	Entwicklung von Funknavigationssystemen für den Luftkrieg im Zweiten Weltkrieg; u. A. das Long Range Navigation (LORAN) System.



die Bewegung von Sonne, Mond und Sternen zu verfolgen, um die günstigste Zeit für die Aussaat festzuhalten.

Die ersten Uhren wurden als Hilfsmittel für die Astronomie gefertigt. Verließ man sich zunächst bei Wasseruhren auf das konstante Tropfen des Wassers, nutzte man später mechanische Uhrwerke, welche die Bewegung des Sonnensystems in kleinem Maßstab nachahmten. In Europa erschien die erste rein mechanische Uhr im 13. Jahrhundert, die aber pro Tag mehrere Stunden verlor und regelmäßig mithilfe einer Sonnenuhr neu eingestellt werden musste.

Etwa zur gleichen Zeit wurden Navigatoren weniger abhängig vom Himmel. Der Kompass ermöglichte es den Seefahrern ihren Weg auch bei bedecktem Himmel zu finden. Vor dessen Erfindung kam der Seehandel in der Winterzeit größtenteils zum Erliegen.

Währenddessen wurde für die Navigation aus einem alten astronomischen Instrument, dem Astrolabium, der zweckmäßige Sextant entwickelt. Damit konnte der Winkel markanter Sterne gemessen und die geografische Breite der Schiffsposition zuverlässig bestimmt werden. Während jedoch die nördliche oder südliche Breite mithilfe der Sterne relativ genau festgelegt werden konnte, erwies sich die Bestimmung der westlichen oder östlichen Länge als schwierig, was die Navigation über lange Strecken zum Glücksspiel werden ließ.

Zurückzuführen war dies auf die Drehung der Erde, durch die sich die Sterne pro Stunde 15 Grad seitwärts bewegen: Jede Zeitabweichung hatte große Positionsabweichungen zur Folge. Erst im 18. Jahrhundert fertigte der autodidaktische Erfinder John Harrison den ersten zuverlässigen Schiffschronometer. Mit einer Abweichung von weniger als fünf Sekunden



in zehn Tagen, war Harrisons Erfindung zuverlässig genug, um Schiffen die sichere Überquerung der Ozeane zu ermöglichen und verhalf ihm zu einem kleinen Vermögen, das die britische Admiralität als Preisgeld ausgesetzt hatte.

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts waren mechanische Uhren immer genauer geworden, nur um durch günstigere und noch präzisere Quarzuhren ersetzt zu werden. Quarzuhren wurden zum wichtigen Bestandteil der neuen Radarsysteme, die im Zweiten Weltkrieg für den Einsatz an Bord von Langstreckenflugzeugen entwickelt wurden. Mit einer Abweichung von wenigen Sekunden in einer Million Jahren erwiesen sich Atomuhren jedoch als weitaus genauer.

Ebenso bedeutend war die Ergänzung des Kompasses durch die auf Kreiselssystemen basierende Trägheitsnavigation. Kreiselkompass bewiesen ihre Effektivität zuerst auf gepanzerten Schiffen, dann in Flugzeugen und schließlich an Bord von Raketen, die Flüge über die Atmosphäre hinaus ermöglichten. All diese technischen Errungenschaften – Raumflug, Satelliten, Funknavigation und Atomuhren – wurden entwickelt, um die Genauigkeit der Navigation weiter voranzutreiben. Sie mussten nur noch zusammengefügt werden.

1957



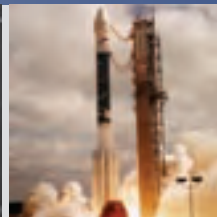
Start von Sputnik; die Analyse seiner Signale zeigt, dass die Dopplerverschiebung zur Bestimmung der Bodenposition genutzt werden kann.

1960



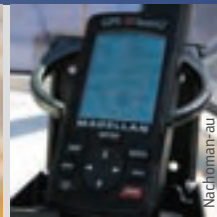
Start des US-Satelliten Transit, erster einer Reihe, die Ortung auf Doppler-Basis einsetzt.

1978



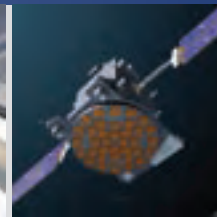
Navstar 1, der erste GPS-Satellit, wird gestartet.

1993



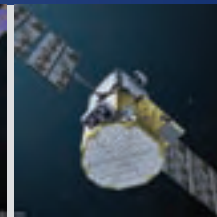
GPS erreicht mit 24 Satelliten volle Einsatzbereitschaft.

2005



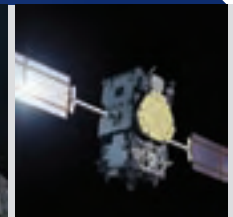
Start des ESA-Satelliten GIOVE-A, sichert Funkfrequenzen für die zukünftige Konstellation.

2008



Start des ESA-Satelliten GIOVE-B, an Bord die präziseste Atomuhr, die je zur Satellitennavigation verwendet wurde.

2011



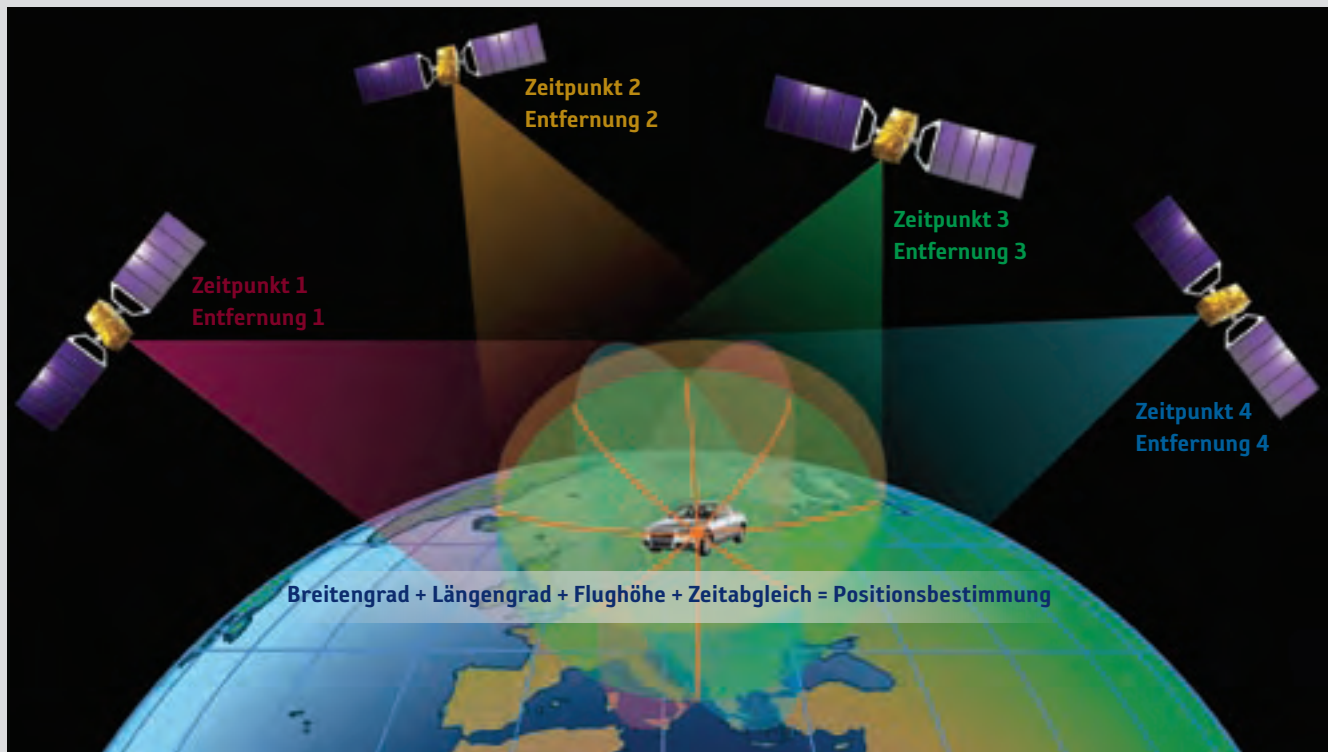
Start der ersten IOV-Satelliten.

## Funkortung, von der Erde ins Weltall

Das Galileo zugrunde liegende Prinzip der Funkortung ist nicht neu. Es wird seit Jahrzehnten auf einer terrestrischen, zweidimensionalen Basis genutzt: Langstreckenflugzeuge bestimmen ihre Position mithilfe eines weltweiten Netzwerks von Funkfeuern. Systeme wie das amerikanische LORAN oder das russische Chayka integrieren Zeitmessungen, sodass Empfänger

die unterschiedlichen Ankunftszeiten der Signale einzelner Funkfeuer messen können, um die Position eines Flugzeugs über der Erdoberfläche bestimmen zu können. Mit der höheren Präzision der Satnav-Systeme ging der Einsatz terrestrischer Funknavigationssysteme jedoch deutlich zurück: LORAN wurde 2010 in den gesamten USA und Kanada abgeschaltet.

# → FUNKTIONSPRINZIP DER SATELLITENNAVIGATION



Navigationssatelliten müssen weithin sichtbar sein. Im 20. Jahrhundert erreichten daher die Sendetürme des Funknavigationssystems LORAN zur Führung des Luftverkehrs nicht selten eine Höhe von mehreren Hundert Metern und Leuchttürme, die Seefahrer vor tückischen Gewässern warnen, sind oft mehrere Dutzend Meter hoch oder stehen auf einer Anhöhe. Im Grunde sind Navigationssatelliten nichts anderes, sie sind lediglich auf einer enormen Höhe im All platziert und daher von jedem Ort der Welt sichtbar.

Jeder Satellit sendet ein Signal im Mikrowellenbereich aus, das die Zeit, zu der es gesendet wurde, und die Position des Satelliten in der Umlaufbahn enthält. Da die Lichtgeschwindigkeit bekannt ist, kann die Zeit, die das Signal bis zum Empfänger braucht, verwendet werden, um die Entfernung zum Satelliten zu berechnen. Galileos Zeit ist bis auf eine Nanosekunde genau\*, sodass diese Entfernung mit hoher Genauigkeit berechnet werden kann. Kombiniert man die gleichzeitig eingehenden Signale mehrerer Satelliten – vergleichbar mit dem gleichzeitigen Anpeilen mehrerer Leuchttürme – lässt sich die eigene Position auf der Erde genau bestimmen; erklärtes Ziel ist es, dass Galileo eine Genauigkeit im Meterbereich erreicht, sobald das Gesamtsystem fertiggestellt ist.

Um sicherzustellen, dass an jedem Punkt der Erde mehrere Signale empfangen werden können, ist eine weite Verteilung der Navigationssatelliten notwendig. Die Genauigkeit der Position steigt mit der Zahl der empfangenen Signale, vier sind aber das absolute Minimum. Drei werden genutzt, um mithilfe der Trilateration (das dreidimensionale Äquivalent der Triangulation) den Längen- und Breitengrad sowie die Höhe des Nutzers zu ermitteln, und ein viertes Signal wird verwendet, um die Zeitverschiebung zwischen der (präzisen) Satellitenuhr und der (weniger präzisen) Uhr im Empfänger des Nutzers zu bestimmen.

Konstruktionsbedingt ist als optimale Höhe für Navigationssatellitenkonstellationen, wie das amerikanische GPS und das russische Glonass, eine mittlere Erdumlaufbahn erforderlich. Im Dezember 1993 wurde nach 20 Jahren Entwicklungsarbeit das GPS fertiggestellt und in Betrieb genommen. Das auch für zivile Nutzer verfügbare GPS war Vorreiter für eine Vielzahl von neuen Anwendungen; Satellitennavigation ist seitdem zu einem festen Bestandteil unseres Lebens geworden. Dennoch bleibt das GPS, genau wie Glonass, ein von ausländischem Militär kontrolliertes System mit dualer Verwendung.

\* eine Sekunde gleicht 1000 Millionen Nanosekunden





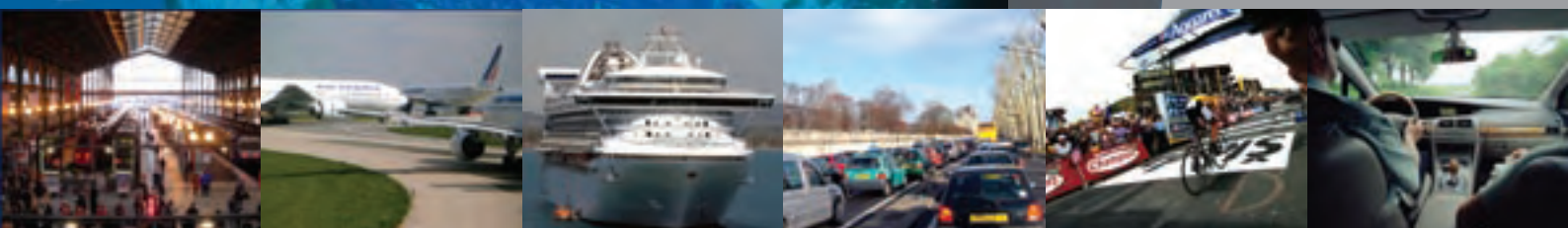
## Empfang der Signale

Moderne Satnav-Empfänger sind klein genug, um sie in Armaturenbretter, Ortungsgeräte oder Mobiltelefone einzubauen. Es ist eine Menge „integrierter Intelligenz“ notwendig, damit sie ihre Aufgabe erfüllen können: ihre Position auf der Erde zu finden.

Zunächst müssen sie mit Antennen, die nur wenige Zentimeter messen, zu mindestens vier Satelliten Kontakt herstellen. Die einzelnen Signale sind jedoch erstaunlich schwach, vergleichbar mit der Energie des Lichtstrahls eines Fahrzeugscheinwerfers, der von einer Seite Europas auf die andere leuchtet. Die Empfänger enthalten deshalb detaillierte Almanache der Satellitenorbits. Da somit bekannt ist, wo sich die unterschiedlichen Satelliten zu einer bestimmten Zeit befinden sollten, verringert sich die Zeit, bis die Empfänger die Signale erfassen, von Minuten auf wenige Sekunden.

Jeder Satellit im All kann über einen individuellen Code identifiziert werden, der so komplex ist, dass er elektrischem Rauschen sehr nahe kommt. Der Empfänger legt diese komplexen Codes in seinem Speicher ab und verwendet sie, um aus den schwachen empfangenen Signalen Kopien mit voller Leistung zu generieren. Durch dieses Verfahren sind keine großen Antennen notwendig, wodurch die Empfänger der Nutzer klein gehalten werden können und Satnav vielseitig einsetzbar ist.

Die stärkeren Versionen des Signals werden für die Berechnung der eigentlichen Navigationsdaten genutzt, die dann dem Nutzer angezeigt werden. Gleichzeitig synchronisieren die Empfänger ihre internen Uhren mit der Atomuhr an Bord des Satelliten, indem sie verzugslos die Zeitabweichung zwischen beiden Uhren ermitteln.



# → EUROPAS ERSTE SCHRITTE

Die enormen potenziellen Vorteile der Satellitennavigation bildeten die Grundlage für die Zusammenarbeit von ESA und EK. In den frühen 1990er Jahren definierten die beiden Organisationen eine europäische Strategie für den Bereich der Satellitennavigation, um Europa in diesem strategischen und wirtschaftlichen Sektor, der zunehmend an Bedeutung gewinnt, die Eigenständigkeit zu sichern.

ESA begann die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Zusammenarbeit mit der EK und der Gemeinschaft der zivilen Luftfahrt. Im Rahmen der Entwicklungsstrategie wurden zwei Hauptsäulen konzipiert:

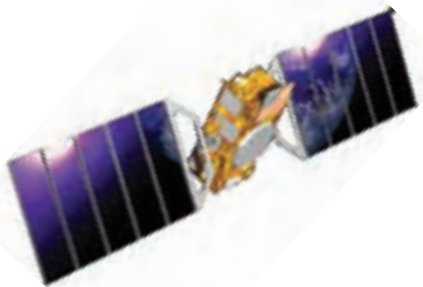
- **EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)** Ein Erweiterungssystem, das europaweit das GPS-System ergänzt, um die Nutzer mit verlässlichen Informationen zu versorgen (die Genauigkeit der GPS-Signale wird mit Hilfe von Korrekturdaten erhöht und der Dienst mit zusätzlichen Informationen verbessert). Es wird zukünftig auch Galileo ergänzen.

- **Galileo** Ein vollständig autonomes und interoperables weltumspannendes Satellitennavigationssystem, das weltweit Navigationssignale für Hochleistungsdienste ausstrahlt.

EGNOS, das bereits heute in Betrieb und zertifiziert ist, bildet die Grundlage für eine Vielzahl von allgemeinen und sicherheitskritischen Anwendungen, die europaweit verfügbar sind (siehe Seite 14).

ESA und EK haben vereinbart, Galileo stufenweise einzuführen. Dazu nahm die ESA 2005 und 2008 je einen GIOVE-Satelliten mit entsprechenden Bodensegmenten in Betrieb. Diese Satelliten ermöglichten den Zugang zu den von der Internationalen Fernmelde-Union (ITU) zugeteilten Galileo-Frequenzen und die Erprobung der Leistungsfähigkeit der Schlüsseltechnologien. Um Platz für die Galileo-Satelliten zu schaffen, werden die GIOVE-Satelliten, die bis heute in einem guten Zustand sind, zurzeit auf eine höhere Umlaufbahn gehoben.

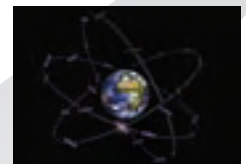
## Galileo Umsetzungsplan



### FOC Phase 2

Alle Dienste

Alle 30 Satelliten und Bodensegment



### FOC Phase 1

Offener Dienst, Such- und Rettungsdienst, öffentlicher regulierter Dienst

Insgesamt 18 Satelliten und Bodensegment



### In-Orbit Validation

4 IOV-Satelliten und Bodensegment



### Galileo System Testbed

GIOVE-A, GIOVE-B, GIOVE Missionssegment





## Ein Start schreibt Geschichte

Der historische erste Schritt der In-Orbit Validation des Galileo-Systems war die Entwicklung der beiden GIOVE-Satelliten, die aus Gründen der Redundanz parallel mit sich ergänzenden Fähigkeiten gebaut wurden. Ihr Name steht für Galileo In-Orbit Validation Element und erinnert zugleich an die Entdeckung des ersten großen Mondes des Planeten Jupiter – „Giove“ auf Italienisch – durch Galileo Galilei.

**GIOVE-A** Der am 28. Dezember 2005 an Bord einer Sojus-Trägerrakete (im Bild) vom Kosmodrom in Baikonur, Kasachstan ins All gestartete GIOVE-A wurde von Surrey Satellite Technology Ltd in Großbritannien gebaut. GIOVE-A trug den ersten Galileo-Signalgenerator in den Orbit und war ausgestattet mit zwei hochstabilen Rubidium-Atomuhren sowie einer phasengesteuerten Antenne mit individuellen L-Band-Elementen (Frequenzbereich 1200–1600 MHz), um die gesamte unter ihm sichtbare Erde zu beleuchten. Zwei Arten von Strahlungsdetektoren überwachen seine Orbitalbewegung.

**GIOVE-B** Der am 27. April 2008 an Bord einer Sojus-Trägerrakete vom Kosmodrom in Baikonur gestartete GIOVE-B wurde von einem Konsortium unter der Leitung von Astrium und Thales gebaut. Er verfügt über folgende Ausstattung: eine verbesserte phasengesteuerte Antenne mit individuellen L-Band-Elementen zur Ausleuchtung der sichtbaren Erde, eine Einheit zur Signalerzeugung, die neuartige Signale erzeugen kann mit Funktionen, denen EU und USA zugestimmt haben, eine außergewöhnlich stabile passive Wasserstoff-Maser-Uhr und eine Rubidium-Uhr sowie einen neuen Strahlungssensor zur Überwachung seiner orbitalen Umgebung.

## Erfahrungen

Die mit GIOVE-A und -B gewonnenen Erkenntnisse halfen beim Design der Galileo IOV-Satelliten. GIOVE-A, Europas erster Navigationssatellit, half Folgendes zu erproben:

- **Satellitendesign** Europas erster Satellit, der auf einer mittleren Erdumlaufbahn betrieben wird, wo die Strahlung besonders intensiv ist.
- **Navigation-Loop der Orbitmodelle** Bestätigte die Orbitmodelle zur Erzeugung der Navigationssignale, mit der erforderlichen Genauigkeit der Orbit- und Uhr-Parameter.
- **Rubidium-Uhr** Beweis in einer rauen Strahlungsumgebung eine hohe Stabilität.
- **Ionosphäreneffekte** Wurden mit einem weltweiten Netz von Bodenstationen beurteilt.
- **Sensorstationen** Daten der 15 GIOVE Experimental-Datenstationen zeigten, dass die grundlegenden Auslegungsannahmen für das operationelle Bodensegment korrekt sind.
- **Zeitversatz von GPS zu Galileo** GPS und Galileo werden mit unterschiedlichen Zeitsystemen betrieben. Damit die beiden Systeme zusammenarbeiten können, müssen daher ihre Zeitdifferenzen genau bekannt sein. GIOVE-Signale enthalten eine Messung der aktuellen Differenz auf experimenteller Basis und zeigen, dass eine Zusammenarbeit der beiden Systeme durchaus realisierbar ist.

Zusätzlich hat GIOVE-B Folgendes gezeigt:

- **Passive Wasserstoff-Maser-Uhr** Hat sich als die stabilste Uhr erwiesen, die jemals für eine fliegende Navigationsanwendung genutzt wurde.
- **Multiplexed BOC** Der leistungsfähige „gebündelte Binary Offset Carrier“ (BOC) in einem der beiden GIOVE-B Kanäle ist eine zukunftsweisende Modulationstechnik, die einen robusten Schutz gegen Signalstörungen und die als „Mehrwegempfang“ (Multipath) bekannte Signalreflexion bietet.



ESA – P. Carril

GIOVE-A



ESA – P. Carril

GIOVE-B

# → ANATOMIE EINES NAVIGATIONSSATELLITEN

Satelliten sind Hochleistungsmaschinen, die für den jahrelangen fehlerfreien Einsatz entwickelt werden. Die Galileo-Satelliten und besonders ihre Navigationsnutzlasten enthalten unzählige Innovationen, um ihre Arbeit über die geplante Nutzungsdauer von 12 Jahren hinweg zu verrichten:

- 1 **L-Band-Antenne** Überträgt das Navigationssignal im L-Band.
  - 2 **Such- und Rettungsantenne** Empfängt Notsignale von Notrufsendern und überträgt sie zur Weiterleitung an örtliche Rettungsdienste an eine Bodenstation.
  - 3 **C-Band-Antenne** Empfängt von den Uplink-Stationen die Signale mit den Missionsdaten. Diese enthalten Daten zum Synchronisieren der Borduhren mit einer Referenzuhr am Boden und Integritätsdaten, die Informationen darüber enthalten, wie gut der einzelne Satellit funktioniert. Diese Integritätsinformationen werden in das Navigationssignal integriert, um sie an die Nutzer zu senden.
  - 4 **Zwei S-Band-Antennen** Teil des Untersystems für Telemetrie, Bahnverfolgung und Satellitensteuerung. Sie senden Housekeeping-Daten über die Satelliten-Plattform und Nutzlast zu Galileos Bodensegment und empfangen im Gegenzug Befehle zur Steuerung der Satelliten und Bedienung der Nutzlast. Die S-Band-Antennen empfangen, verarbeiten und senden zudem Ortungssignale, die die Höhe des Satelliten bis auf wenige Meter genau messen.
  - 5 **Infrarot-Erdsensor und** 6 **Sonnensensor** Halten den Satelliten auf die Erde ausgerichtet. Der Infrarot-Erdsensor erkennt den Kontrast zwischen der Kälte des Weltalls und der Wärme der Erdatmosphäre. Als Sonnensensoren dienen Detektoren für den sichtbaren Spektralbereich, die den Sonnenwinkel messen.
  - 7 **Laser-Retroreflektor** Reflektiert den von einer Bodenstation ausgestrahlten Laserstrahl zur zentimetergenauen Messung der Satellitenentfernung. Der Reflektor wird nur etwa einmal pro Jahr genutzt, da Höhenmessungen per S-Band Antenne ansonsten ausreichend genau sind.
  - 8 **Weltraum-Radiatoren** Geben überschüssige Wärme in den Weltraum ab, um die Betriebstemperatur der Bordelektronik im optimalen Bereich zu halten.
  - 9 **Passive Wasserstoff-Maser-Uhr** Die Hauptuhr des Satelliten. Zur Redundanz sind zwei an Bord. Diese Atomuhr nutzt die hochstabilen Energieschwingungen eines Wasserstoffatoms, um die Zeit mit einer Genauigkeit von 0,14 Nanosekunden in 12 Stunden zu messen.
- **Rubidium-Uhr** Eine Atomuhr, die durch die Verwendung einer anderen Technologie eine Redundanz zu den Maser-Uhren gewährleistet. Ihre Genauigkeit liegt bei 1,8 Nanosekunden in 12 Stunden.
  - **Uhr-Überwachungs- und Steuereinheit** Dient als Schnittstelle zwischen den vier Uhren und dem Navigationssignalgenerator. Sie gewährleistet zudem, dass die Frequenzen der Hauptuhr und der aktiven Ersatzuhr in Phase sind, sodass die Ersatzuhr beim Ausfall der Hauptuhr verzugslos übernehmen kann.
  - **Navigationssignalgenerator** Verwendet Daten der Uhr-Überwachungs- und -steuereinheit und zugesandte Navigations- und Integritätsdaten der C-Band-Antenne, um die Navigationssignale zu generieren. Die Navigationssignale werden zur Übertragung an die Nutzer ins L-Band umgewandelt.
  - **Kreiselgeräte** Messen die Rotation des Satelliten.
  - **Reaktionsräder** Dienen der Lagekontrolle des Satelliten. Wenn Sie sich drehen, dreht sich auch der Satellit, in entgegengesetzter Richtung. Der Satellit rotiert zweimal pro Umlauf, damit die Solarflügel auf die Sonnenstrahlen gerichtet bleiben.
  - **Magnetotorquer** Ändert durch ein magnetisch erzeugtes Drehmoment (Drehkraft) in entgegengesetzter Richtung die Rotationsgeschwindigkeit der Reaktionsräder.
  - **Einheit zur Energieaufbereitung und -verteilung** Regelt und steuert die Verteilung der Energie des Sonnensegels und der Batterien an alle Subsysteme des Satelliten und die Nutzlast.
  - **Bordcomputer** Steuert Satellitenplattform und Nutzlast.



ESA - J. Huart

## FOC-Architektur im Orbit

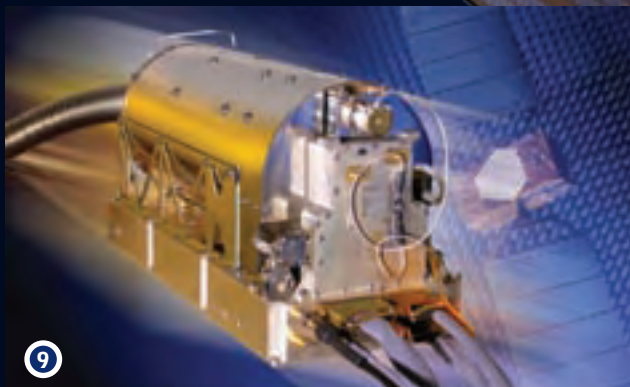
Die voll funktionsfähige (FOC) Gesamtkonstellation wird aus 27 aktiven Satelliten (plus drei in Reserve) bestehen, die die Erde in einer Höhe von 23.222 km mit einem orbitalen Neigungswinkel von 56° zum Äquator auf drei kreisförmigen mittleren Umlaufbahnen umkreisen, deren Ebenen jeweils durch 120 Längengrade getrennt sind.

## Atomuhrtechnik

Atomuhren, die auf Erdumlaufbahnen gebracht werden, sind die technologische Grundlage der Satellitennavigation. Alle Uhren basieren auf regelmäßigen Schwingungen – traditionell das Schwingen eines Pendels, Ticken eines Uhrwerks oder Pulsieren eines Quarzkristalls. Hochpräzise Atomuhren stützen sich auf den Wechsel des Energiezustands der Elektronenhülle eines Atoms, der durch Licht-, Laser- oder Maserenergie angeregt wird.

Die erste, 1955 in England entwickelte Atomuhr hatte die Größe eines Zimmers. Für die Satellitennavigation lag die Herausforderung darin, eine Konstruktion zu finden, die für den Einsatz im All kompakt und robust genug war. Dank langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeit der ESA konnten in Europa zwei unterschiedliche Atomuhrtechnologien entwickelt und zugelassen werden, deren Tauglichkeit für den Einsatz unter den rauen Bedingungen im All durch die GIOVE-Missionen nachgewiesen wurde.

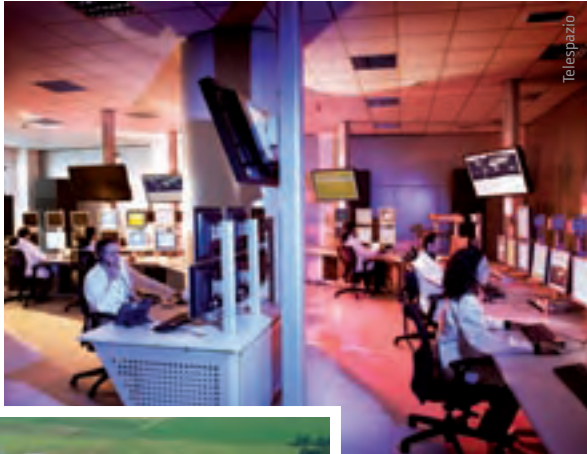
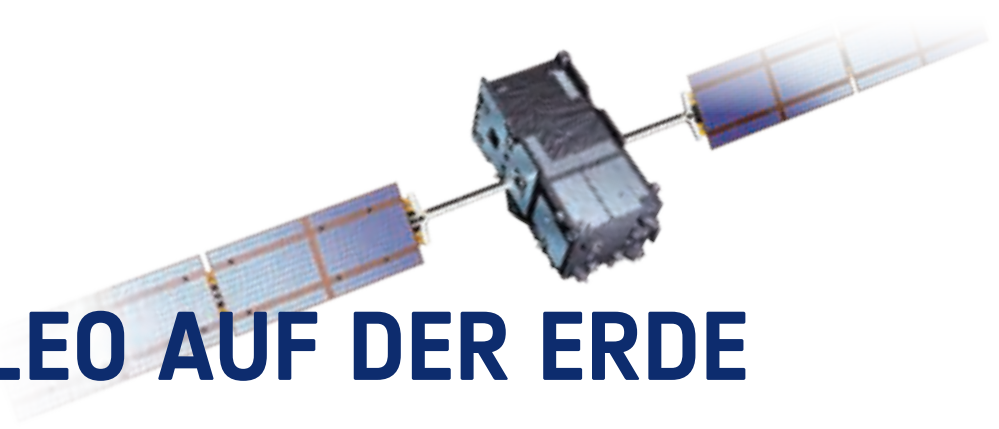
Galileo ist mit beiden Typen von Atomuhren bestückt: eine kleinere Rubidium-Atomuhr mit einer Abweichung von drei Sekunden in einer Million Jahren und eine größere Wasserstoff-Maser-Uhr mit einer Abweichung von einer Sekunde in einer Million Jahre.



9

ESA - P. Carril

# → GALILEO AUF DER ERDE



Galileo Kontrollzentrum, Fucino, Italien



Galileo Kontrollzentrum, Oberpfaffenhofen, Deutschland



Galileo In-Orbit Testeinrichtung, Redu, Belgien



Galileo Bodenstation, Kourou, Französisch-Guayana



TTC-Antenne, Kiruna, Schweden



Sensorstation, Svalbard, Norwegen



Galileo Uplink- und Sensorstation, Neukaledonien, Südpazifik

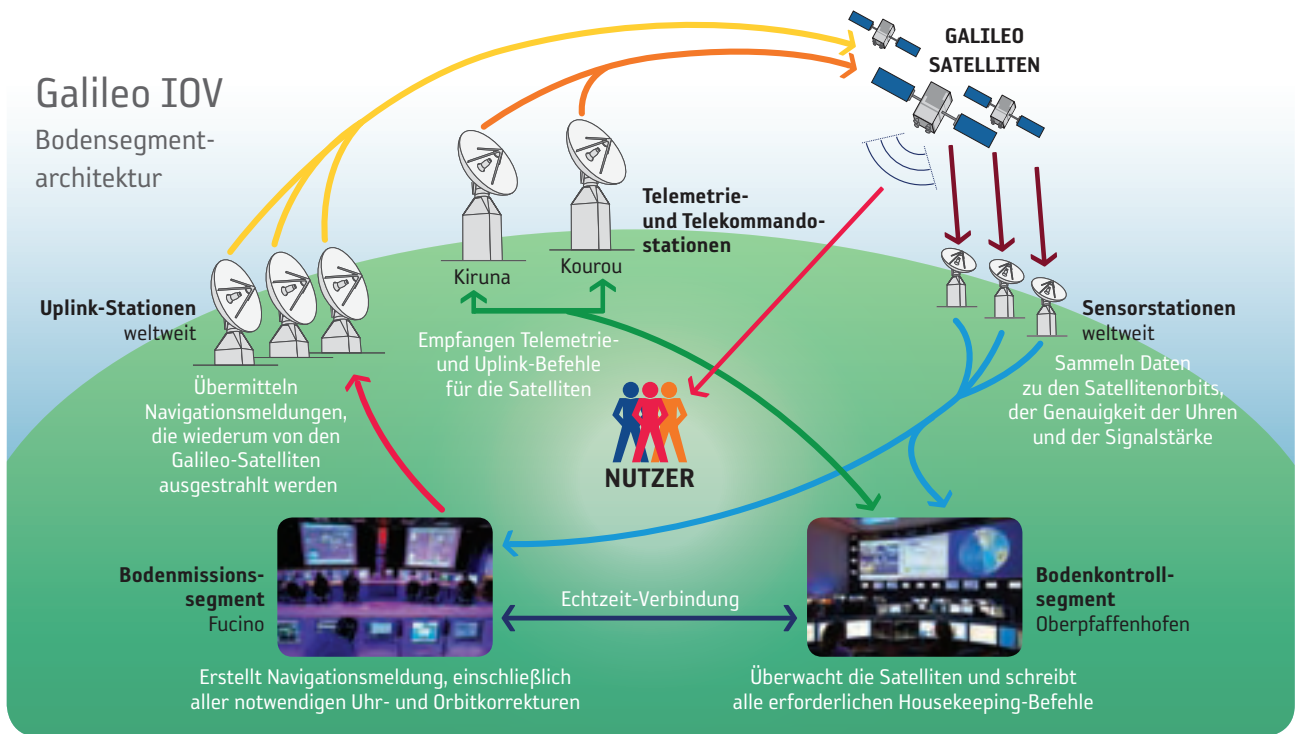
Galileo umfasst aber mehr als nur die Satelliten im All. Eine wichtige Rolle übernimmt auch das weltumspannende Netzwerk am Boden, das die Zuverlässigkeit der Zeit- und Positionsinformationen gewährleistet, die in den Signalen aus dem All enthalten sind.

Satellitenavigation beruht darauf, dass der Empfänger mit einer extrem hohen Genauigkeit die Zeit und den Punkt im Raum zum Zeitpunkt der Übertragung des Signals ermitteln kann. Diese Informationen sind in dem Signal selbst enthalten. Aber auch Atomuhren an Bord eines Satelliten können abweichen – und bereits eine Abweichung von lediglich einer Milliardstel Sekunde führt zu einem Positionsfehler von 30 cm.

Daher vergleicht ein Netz von Bodenstationen die Borduhren aller Satelliten kontinuierlich mit der Galileo-Systemzeit, die im Galileo-Kontrollzentrum Fucino in Italien von einer Einrichtung namens „Precise Timing Facility“ generiert wird. Eine Gruppe von europäischen Zeitlaboratorien synchronisiert wiederum diese Einrichtung mit der internationalen koordinierten Weltzeit (UTC).

Auch Satellitenumlaufbahnen driften, angetrieben von der Anziehungskraft von Mond und Sonne und der leichten äquatorialen Ausbuchtung der Erde. Selbst der leichte aber stete Schub des Sonnenlichts kann Satelliten auf ihrer Umlaufbahn beeinflussen. Die weltweit vernetzten Bodenstationen, die Galileos Signale erfassen, kehren daher das Verfahren zur Funkortung um und bestimmen ihrerseits die aktuelle Position des sendenden Satelliten und ermitteln so Abweichungen von der Umlaufbahn.

Diese Informationen über die Genauigkeit der Borduhren und die Positionen der Satelliten werden gesammelt, sodass eine Korrekturmeldung zu den Satelliten gesendet werden kann, die diese wiederum in den Satellitensignalen selbst an die Nutzer weiterleiten. Dieser in sich geschlossene Kreislauf gewährleistet, dass die optimale Systemleistung über lange Zeit aufrecht erhalten werden kann. Zusätzlich wird die Qualität und Zuverlässigkeit jedes einzelnen Galileo-Signals überprüft.



Das Galileo-Bodensegment ist mit seinen strikten Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Sicherheit eine der kompliziertesten jemals von der ESA durchgeführten Entwicklungen.

- **Bodenmissionssegment (Ground mission segment – GMS)**  
Es ist Teil des italienischen Kontrollzentrums Fucino, verarbeitet die von einem weltweiten Stationsnetz gesammelten Daten und muss rund um die Uhr modernste Navigationsleistung mit höchster Geschwindigkeit liefern. Das GMS hat einen Softwarecode mit zwei Millionen Zeilen, 500 interne Funktionen, 400 Meldungen und 600 Signale, die durch 14 verschiedene Elemente zirkulieren.
- **Bodenkontrollsegment (Ground control segment – GCS)**  
Es ist Teil des deutschen Kontrollzentrums Oberpfaffenhofen und überwacht und steuert die Konstellation mit einem hohen Grad der Automatisierung.

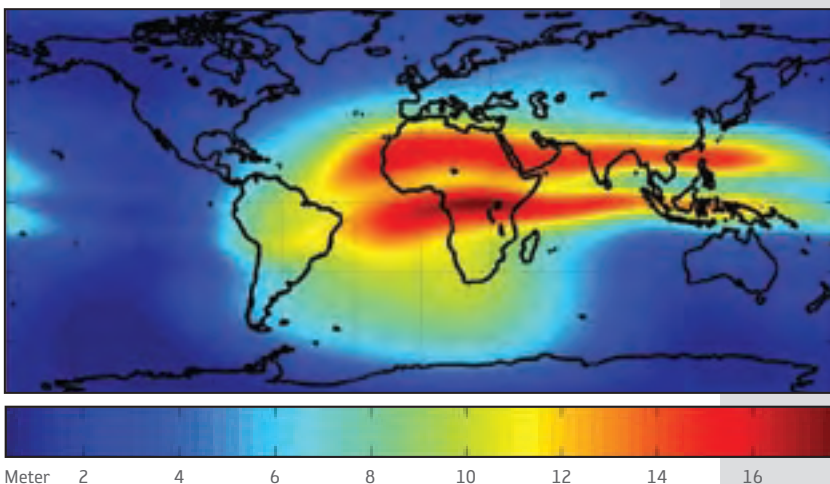
Während der IOV-Phase haben die beiden Kontrollzentren getrennte Funktionen; zukünftig werden sie aber als Hot-Backups mit Datensynchronisation in Echtzeit zusammenarbeiten. Im Falle eines Totalausfalls eines Zentrums kann das andere den Betrieb weiterführen.

- **Telemetrie- und Telekommandostationen** Zwei, je eine in Kiruna, Schweden, und in Kourou, Französisch-Guayana.
- **Uplink-Stationen** Ein Netz von Stationen, die Navigations- und Integritätsdaten zu den Satelliten senden.
- **Sensorstationen** Ein globales Netz zur Uhrensynchronisation und Orbitanalyse.
- **Datennetz** Verbindet alle Galileo-Bodeneinrichtungen.

## Die Herausforderungen der Ionosphäre

Einfallende Sonnenstrahlung spaltet Luftmoleküle im oberen Bereich der Atmosphäre auf und lässt eine unter dem Namen Ionosphäre bekannte elektrisch geladene Schicht entstehen. Funkpioniere nutzten die Ionosphäre, um ihre Signale über den Horizont der Erde hinweg zu reflektieren; für die Satellitennavigation ist sie jedoch mehr ein Hindernis als eine Hilfe.

Ionosphärische Störungen können Signalverluste der Empfänger und beträchtliche Signalverzögerungen verursachen, die schlimmstenfalls zu Positionsabweichungen von Dutzenden Metern führen. Zweifrequenzempfänger, die gleichzeitig zwei Satnav-Frequenzen empfangen, können diese Art von Fehler überwinden. Einfrequenzempfänger, wie sie in Fahrzeugen und Mobiltelefonen verwendet werden, sind zur Kompensation dieser Ionosphärenfehler auf Korrekturwerte angewiesen, die vom Galileo-Bodensegment generiert werden und in der Signalmeldung enthalten sind. Um diese Korrekturwerte zu berechnen, enthält Galileo ein hochmodernes System zur Modellierung der Ionosphäre.



Die Ionosphäre gegen 12:00 Uhr mittags GMT. Dargestellt sind die ionosphärischen Szintillationen aufgrund einfallender Sonnenenergie und die daraus eventuell entstehenden Positionsabweichungen.

# → HEUTIGE UND ZUKÜNFTIGE DIENSTE

## Heute: EGNOS

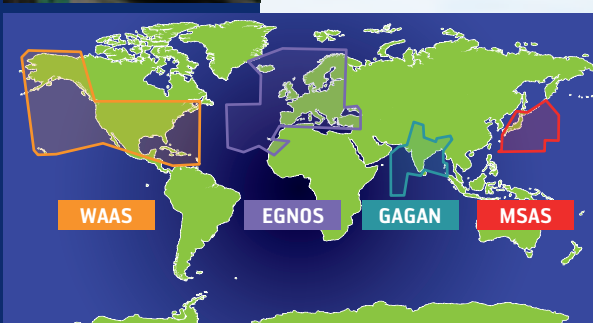
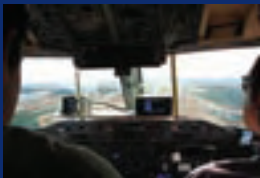
EGNOS, die erste Säule des europäischen Navigationsprogramms, ist bereits im Betrieb und verbessert europaweit die Genauigkeit der GPS-Signale. Zusätzlich erhalten Nutzer basierend auf den Orbits der Satelliten, der Genauigkeit der Atomuhren und der ionosphärischen Laufzeitverzögerung, Informationen über die aktuelle Integrität (Zuverlässigkeit) des Systems. Fällt die Genauigkeit des Signals unter einen festgelegten Schwellwert, erhalten die Nutzer innerhalb von sechs Sekunden eine Warnung.

Der **offene Service** für Anwendungen wie private Navigationsdienste, Warenverfolgung und Präzisionslandwirtschaft, bei denen keine Gefahr für menschliches Leben besteht, ist bereits seit Oktober 2009 verfügbar.

Der **Safety-of-Life (sicherheitskritische) Dienst**, bei dem Menschenleben von der Genauigkeit und Integrität des Signals abhängen, wurde für seinen primären Zweck, die Flugzeugnavigation (beginnend mit der vertikalen Führung beim Landeanflug), im März 2011 freigegeben.

Das System basiert auf einem Netz aus Bodenstationen, Kontrollzentren und drei geostationären Satelliten. Die Bodenstationen sammeln Daten zur aktuellen Genauigkeit des GPS-Signals und gliedern es in das EGNOS-Signal ein, das zu den Satelliten gesendet wird, die es an die Nutzer ausstrahlen. Eins der EGNOS-Master-Kontrollzentren befindet sich bei der deutschen Flugsicherung in Langen.

EGNOS wurde nach internationalen, von der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO) festgelegten Standards entwickelt. Seine Entwicklung wurde mit anderen satellitengestützten Erweiterungssystemen weltweit koordiniert: MSAS in Japan, WAAS in den USA und GAGAN in Indien.







## Zukünftig: EGNOS plus Galileo

Sobald Galileo betriebsfähig ist, werden Galileo und EGNOS eine auf die Bedürfnisse der Nutzer abgestimmte Palette an Navigationsdiensten anbieten:

- **Offener Dienst** Das Galileo-Navigations-signal wird der Öffentlichkeit kosten-frei zur Verfügung stehen und die Satellitennavigation verbessern.
- **Öffentlicher regulierter Dienst** Zwei verschlüsselte Signale mit kontrollier-tem Zugang für spezielle Nutzer wie staatliche Einrichtungen.
- **Such- und Rettungsdienst** Galileo wird zum internationalen Such- und Ret-tungssystem Cospas-Sarsat beitragen. Ein eingehendes Notsignal wird zur Rettungsleitstelle weitergeleitet und die Nutzer werden von Galileo darüber informiert, dass ihre Situation erkannt wurde.
- **Safety-of-Life (sicherheitskritischer) Dienst** Die Leistungsfähigkeit dieses Dienstes, der die Standards der ICAO erfüllt und dank EGNOS bereits für die Luftfahrt verfügbar ist, wird mit Galileo noch weiter erhöht.
- **Kommerzieller Dienst** Galileo wird ein verschlüsseltes Signal mit einem hohen Datendurchsatz und einer großen Genauigkeit bereitstellen, das besonders für professionelle Nutzer interessant sein dürfte.

Die Anwendungsmöglichkeiten für die Satellitennavigation sind praktisch gren-zenlos. Die Satellitennavigation, von deren Sicherheit, Effizienz und Komfort heute schon der Verkehrssektor profitiert, wird zu-künftig für die meisten Wirtschaftsbereiche zu einem wertvollen Werkzeug werden.



Die Positionsbestimmung und -verfolgung wird genau so wichtig sein, wie die Kennt-nis der Tageszeit. Die Integration von Satnav mit anderen Technologien wie Mobilfunk oder traditionellen Navigationshilfen wird ihren Nutzen vervielfachen.

## Die Entwicklung der europäischen Satellitennavigation

EGNOS und Galileo werden von Dauer sein. ESAs Satnav-Entwick-lungsprogramm geht der Frage nach, wie die beiden Systeme weiterentwickelt werden können. Die Forschungsarbeiten an zu-künftigen Verbesserungen, wie die Ausweitung der Abdeckung der Erweiterungssysteme, hat bereits begonnen. Dabei wird unter anderem untersucht, wie der Navigationsbedarf in der Arktis, der aufgrund der abnehmenden Eisdecke stetig zunimmt, am besten gedeckt werden kann. Noch präzisere Atomuhren und Intersatelli-ten-Verbindungen, um Galileos Abhängigkeit von seinen Boden-segmenten bei der Korrektur der Uhren zu senken, sind weitere Schwerpunkte.

Eine verbesserte Modellierung der Ionosphäre wäre eine weitere Innovation, die die Genauigkeit von Galileo und EGNOS erhöhen würde und gleichzeitig von wissenschaftlichem Interesse wäre. Navigationssatelliten-„Reflektometrie“ ist ein weiteres Forschungs-gebiet: Einfangen reflektierter Satnav-Signale mit speziellen Emp-fängern, um wissenschaftliche und ökologische Daten über die Meeres- und Landfläche der Erde zu sammeln, einschließlich Höhe und „Rauigkeit“ der Meeresoberfläche, Windfelder, Eisausdehnung, Bodenfeuchte und Biomassedichte.

# → GALILEO IOV IM ÜBERBLICK

IOV-PFM

## Die Zukunft gestalten: Galileos Partner

Die drei ersten Phasen des Galileo-Programms, Definition, Entwicklung und In-Orbit Validation, werden von der ESA durchgeführt und von der EK mitfinanziert. Die Phase zum Erreichen der vollen Funktionsfähigkeit (FOC) wird von der EK verwaltet und finanziert. Die Kommission und ESA haben in einer Delegationsvereinbarung festgelegt, dass die ESA im Namen der EK die Design- und Beschaffungsaufgaben wahrnimmt.

## Galileo IOV Satellit

Masse	circa 700 kg
Abmessungen, Solarflügel verstaut	3,02 x 1,58 x 1,59 m
Abmessungen, Solarflügel ausgefahren	2,74 x 14,5 x 1,59 m
Nutzungsdauer	mehr als 12 Jahre
Verfügbare Leistung	1420 W (Sonnenlicht) / 1355 W (Verdunkelung)

## Orbit

Höhe	23.222 km
Neigungswinkel	56°

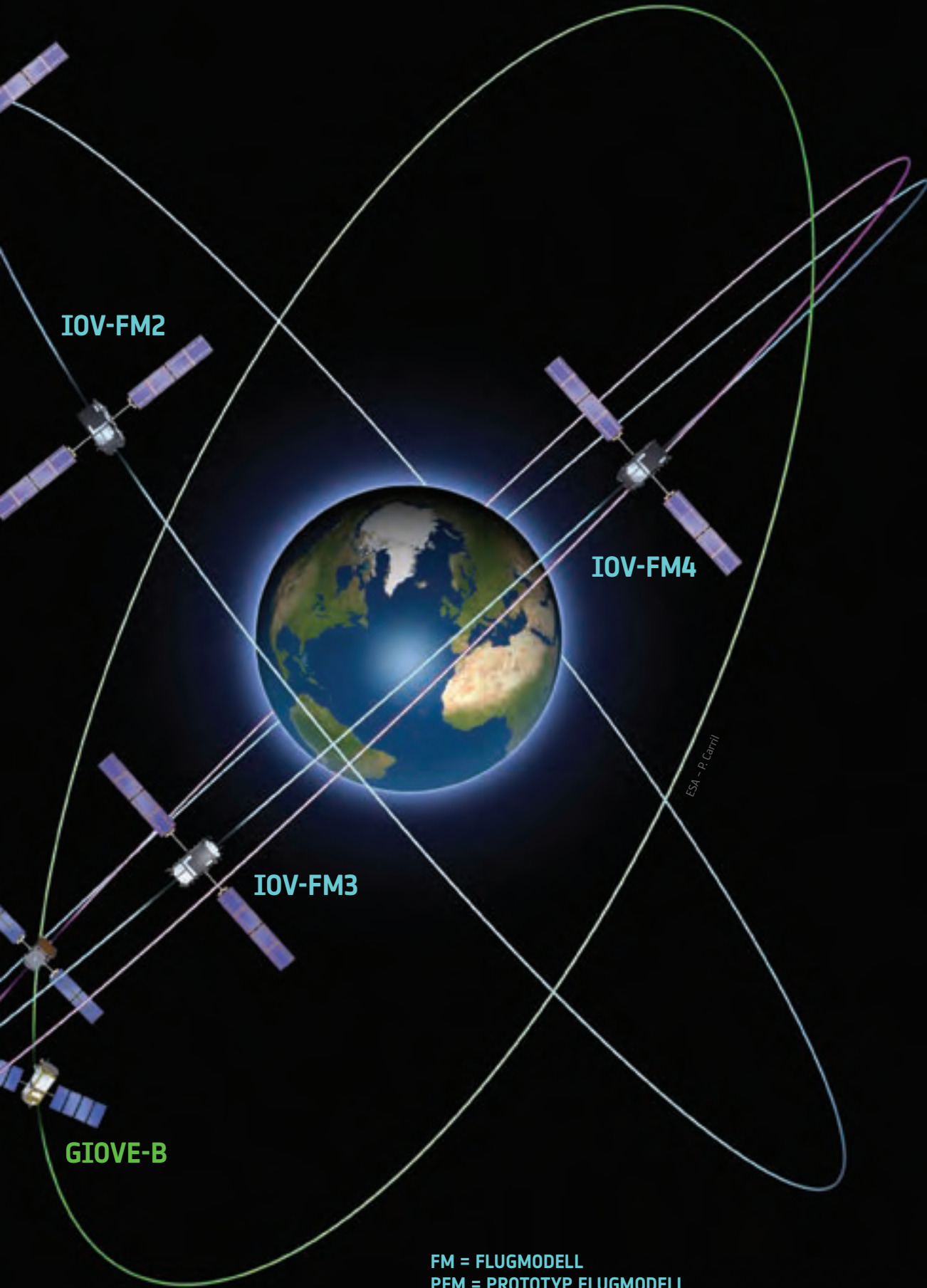
## Galileo IOV Hauptauftragnehmer

Raumsegment	EADS Astrium GmbH (DE) als Satellitenhauptlieferant, mit Thales Alenia Space (IT) als Subunternehmer für die Satellitenintegration
Betriebssegment	SpaceOpal, ein Konsortium gegründet von DLR (DE) und Telespazio (IT)
Systemunterstützung	Thales Alenia Space (IT)
Bodenmissionssegment	Thales Alenia Space (FR)
Bodenkontrollsegment	EADS Astrium UK
Test-User-Segment	Thales Avionics (FR), Septentrio (BE)
Globales Datennetz	British Telecom (GB)

GIOVE-A

## Weitere Informationen

[www.esa.int/navigation](http://www.esa.int/navigation)  
[www.esa.int/egnos](http://www.esa.int/egnos)  
[www.esa.int/galileo](http://www.esa.int/galileo)  
<http://ec.europa.eu/galileo>  
[www.satellite-navigation.eu](http://www.satellite-navigation.eu)  
[www.egnos-portal.eu](http://www.egnos-portal.eu)  
[www.gsa.europa.eu](http://www.gsa.europa.eu)



**IOV-FM2**

**IOV-FM4**

**IOV-FM3**

**GIOVE-B**

*ESA - P. Carril*

**FM = FLUGMODELL  
PFM = PROTOTYP FLUGMODELL**

