



# Das Europäische Satelliten-Navigationssystem Galileo im Vergleich zu GPS und die Bedeutung der Zeithaltung

**Vortrag OV Z21 – 7. Oktober 2010**

<http://www.esa.int/navigation>

**M. Lugert, Head of Ground Facilities Operations, ESOC**



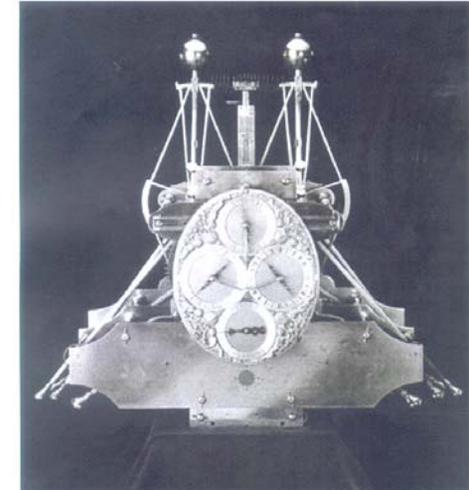


# Wie funktioniert Satellitennavigation?



Jahrhunderte lang benutzten wir den **Stand der Sonne, Sterne und Planeten und die Uhrzeit** um unsere Position zu bestimmen. Die **Genauigkeit der Positionsbestimmung** wird dadurch hauptsächlich durch die **Genauigkeit der Zeitbestimmung** bestimmt. Nur mit der Erfindung von ganggenauen Uhren gelang es im 18. Jahrhundert eine verlässliche Navigation zu erzielen.

**Navigationssatelliten** sind vergleichbar mit **künstlichen Himmelskörpern deren Position (Orbit) genau bekannt ist** und die ein **genaues Zeitsignal aussenden**, mit der die **Entfernungen** zwischen dem Satelliten und einem Standort am Boden sehr **genau bestimmt** werden kann. Durch **Messungen mit mehreren Satelliten** kann damit die Position ermittelt werden.



H1 Clock, J. Harrison

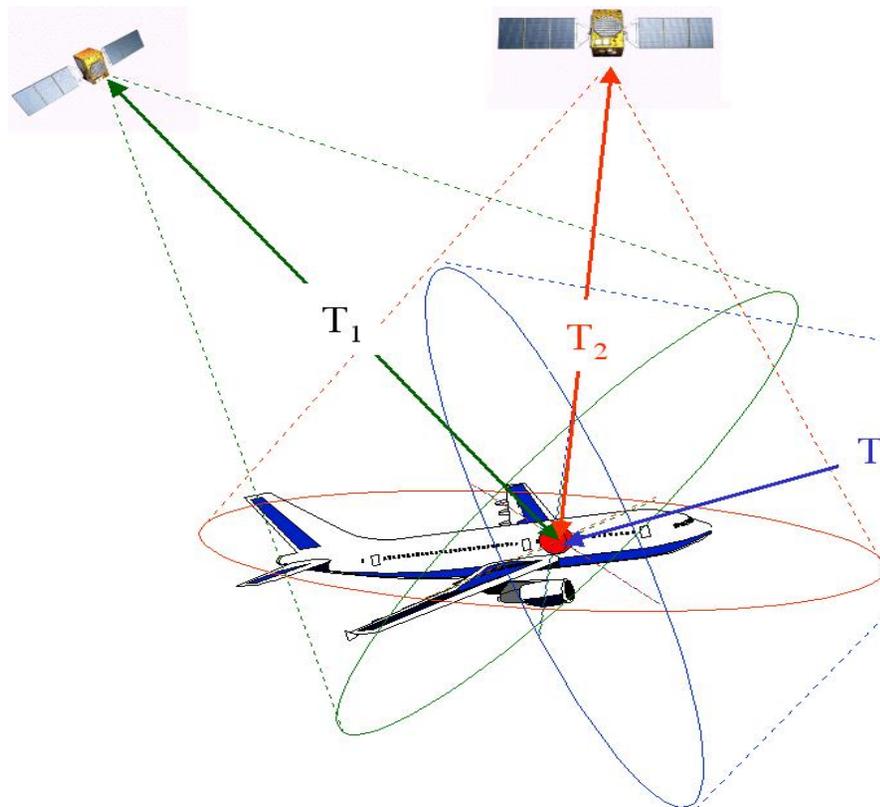


Rubidium Atomuhr, ESA



# Wie funktioniert Satellitennavigation?

Es erfolgen **mehrere Entfernungsmessungen** - durch **Messung der Signallaufzeit** - zwischen dem **Nutzer** und den **Navigationssatelliten**, aus denen sich unter Nutzung der **Navigationssdaten** (Orbitpositionen, Korrekturwerte etc.) die Position bestimmen lässt.

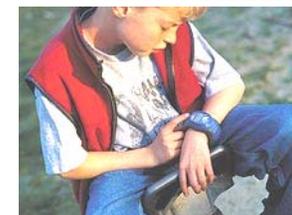


Aufgrund begrenzter  
Uhrengenauigkeit in einem  
Navigationsempfänger  
werden tatsächlich  
mindestens 4  
Satellitensignale benötigt!  
Der Uhrenfehler in einem GPS  
Empfänger macht sich auf alle  
Messungen gleichermaßen  
bemerkbar.





# Aktuelle und zukünftige Anwendungen der Satellitennavigation



- **Luftfahrt & Schifffahrt:** Weltweite Navigation unter allen Wetterbedingungen und in Gebieten ohne aufwendigere Navigationshilfen
- **Strassen & Schienenverkehr:** Autonavigationssysteme, Routenberechnung and Führung, Flottenmanagement, Straßenbenutzungsgebühren (Tolling)...
- **Wissenschaft & Technik:** Geomapping, Geoinformationssysteme, Erschließung von Bodenschätzen, Zeitsynchronisation ..
- **Sicherheit und hoheitliche Aufgaben:** Überwachung, Rettungsdienste, Krisenmanagement
- **Sport & Freizeit:** Wandern, Yachting, Geochaching...

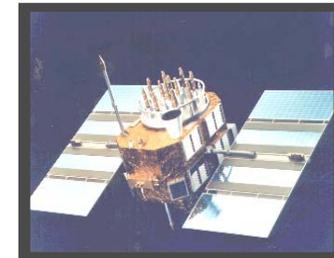




## Bestehende Satellitennavigationssysteme Global Positioning System – GPS, USA



- Aktuell ein **Mix aus 30 operationellen Block II, IIA, IIR Satelliten** und Block IIR-M Satelliten
- Der erste Block II Satellite wurde vor mehr als **20 Jahren (Feb 89)**; der **aktuellste Block IIR-M Satellite wurde im August 2009** gestartet
- Minimale Konstellation: **24 Operationelle Satelliten**
- **6 feste zirkulare Bahnebenen, geneigt um jeweils 60 °** mit jeweils mindestens 4 Satelliten pro Bahnebene
- Inklination ca. 55 °, 2 Umläufe/Siderischen Tag, Bahnradius ca. 26.600 Km
- Ca. 10 Satelliten sichtbar an jedem Punkt der Erde



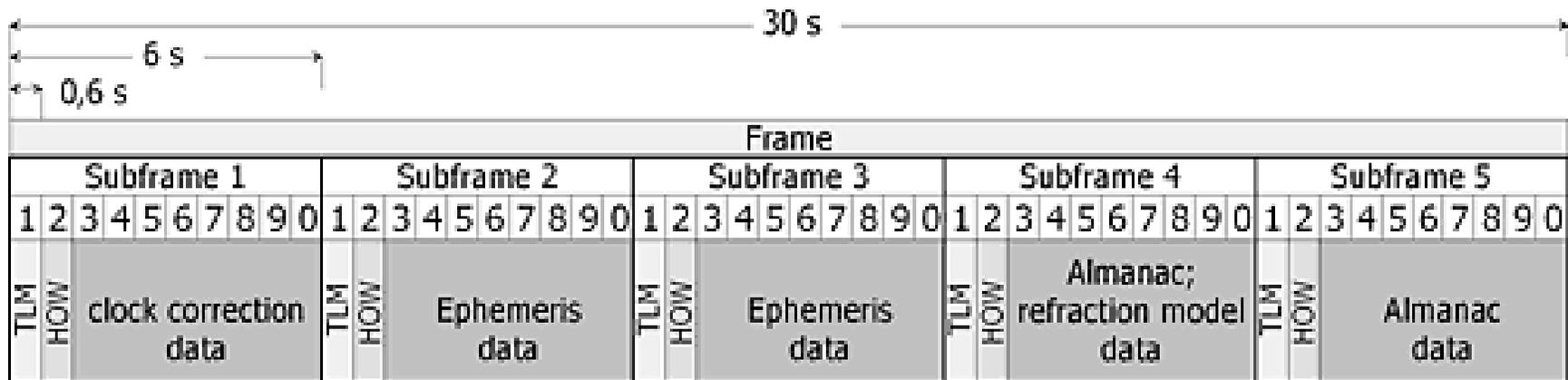


# Bestehende Satellitennavigationssysteme

## Global Positioning System – GPS, USA



- **50 bit/s Navigationstelemetry**, die innerhalb einer Rahmenwiederholrate von 12.5 Minuten 37.500 bit in 25 je 30 Sekunden langen Rahmen mit 5 Unterrahmen mit u.a. die **Orbitalinformation (Ephemeriden, Almanach), Ionorefraktionsmodell, Satellitenstatus und Uhrenkorrekturdaten** überträgt

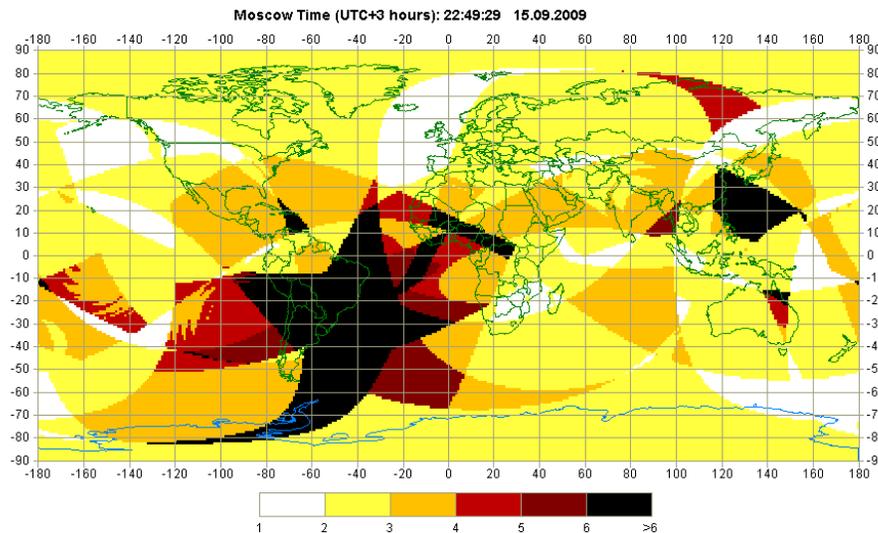
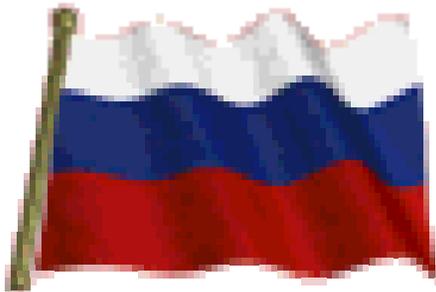
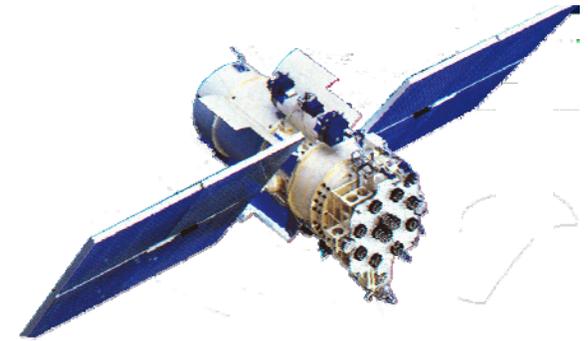




# Bestehende Satellitennavigationssysteme Global Navigation Satellite System (GLONASS) Russland



- Konstellation mit **24 Satelliten in 3 um 120 ° geneigte Bahnebenen**, nominal 21 Satelliten operationell, 3 Satelliten zur Reserve
- Aktuell 20 Satelliten im Orbit wovon 19 operationell
- Min. 18 Satelliten für Ausleuchtung der Russischen Föderation, 24 Satellite für weltweite Ausleuchtung
- Zirkularer Orbit, H=19 100 km und Inklination von 64.8°
- Umlaufzeit: 11h 15 min, Versatz der Satelliten in der Bahnebene jeweils 15°





# Ergänzungssysteme (Augmentations) zu bestehenden Systemen



- GPS/GLONASS werden durch satellitengestützte Systeme ergänzt, sogenannte Satellite Based Augmentation Services (SBAS)



- USA : WAAS (Wide Area Augmentation System)



- EUROPE : EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)



- JAPAN :

- MSAS (Multifunctional Transport Satellite Augmentation System)
- QZSS (Quasi Zenith Satellite System)



- INDIA : GAGAN



- CHINA : BEIDOU-2





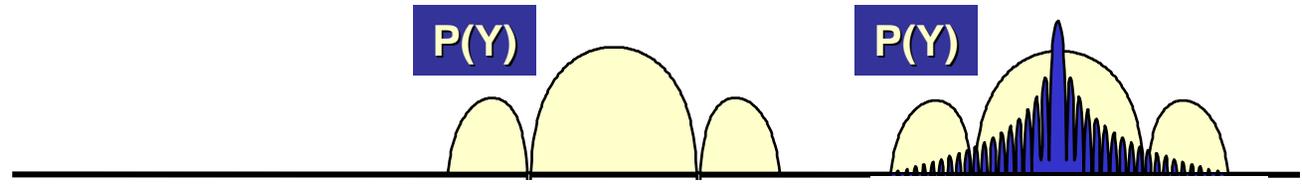
# Ziviles GPS Modernisierungsprogramm



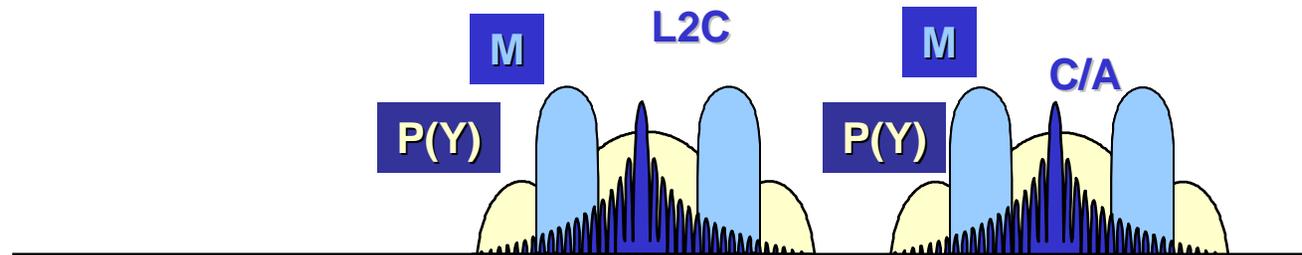
- Ende der künstlichen Verschlechterung des zivilen Signals (Selective Availability - SA) 1<sup>st</sup> of May 2000
- Ziviles öffentliches Signal zur Zeit nur GPS L1-Signal
  - Coarse Acquisition (C/A) code auf 1575.42 MHz
- Weitere zivile öffentliches Signale im Aufbau:
  - L2C – Signal mit C/A-type Code auf 1227.60 MHz
  - L5 Signal mit P-type codes at 1176.45 MHz (Safety-of Life)



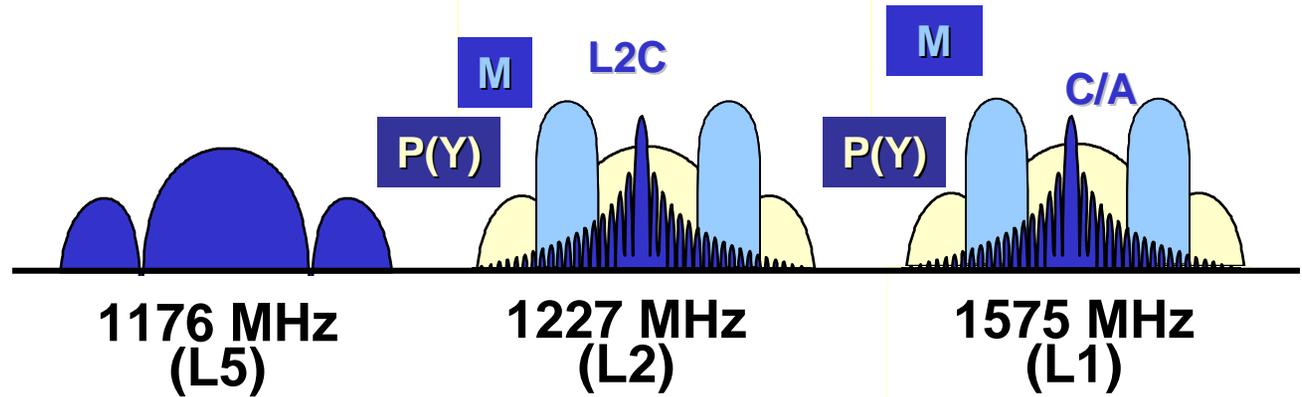
Bestehendes  
Block II/IIA/IIR



2. Ziviles Signal  
L2C - M-Code  
Block IIR-M



3. Ziviles Signal  
L5 - BOC  
Block IIF



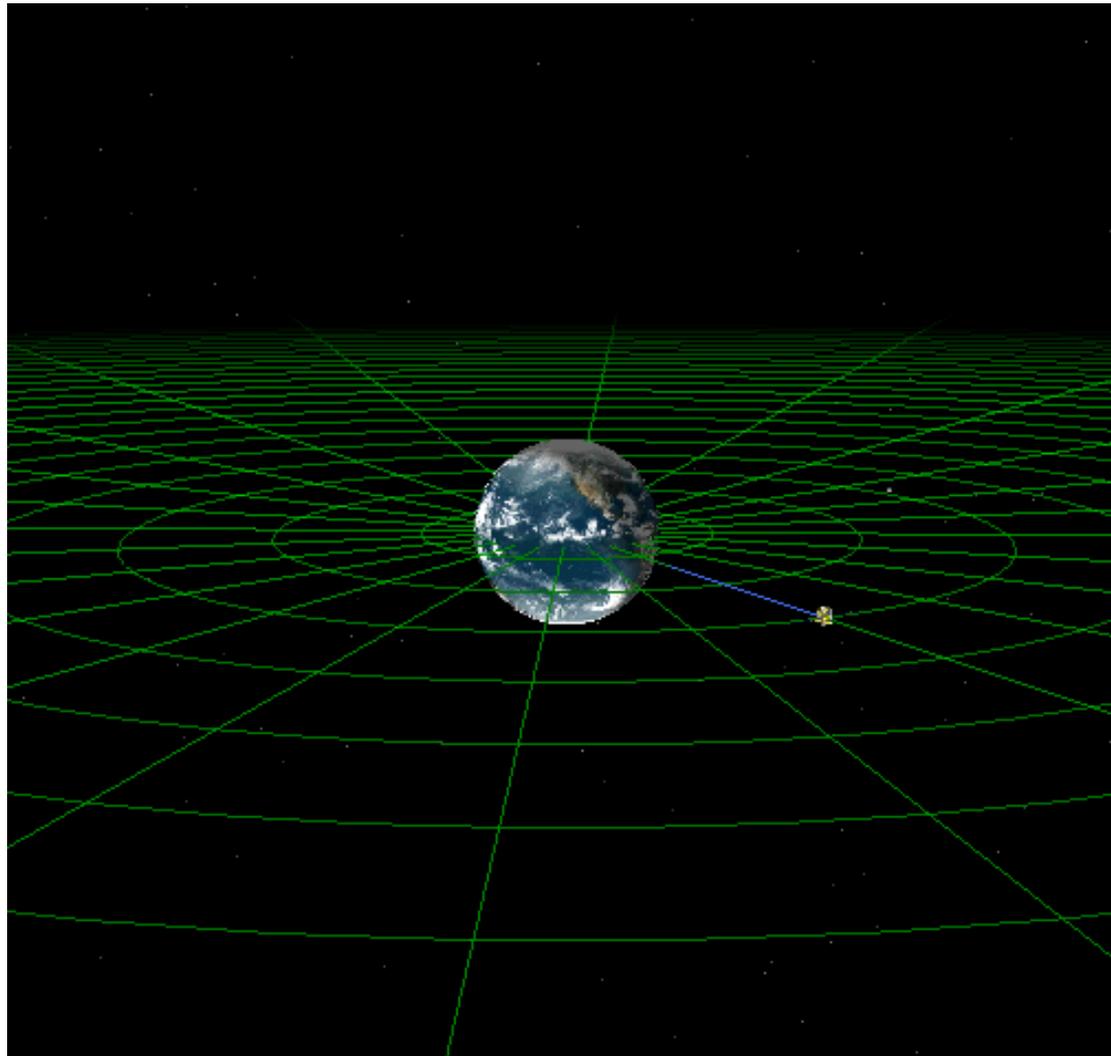


# Galileo Gesamtarchitektur





# Galileo Satellitenkonstellation - Animation



**Walker Konstellation:**  
27/3/1  
plus 3 in-orbit Reserven  
(1 pro Ebene)

**Bahnradius:**  
~29600 km

**Inklination:**  
56 deg

**Periode:**  
~ 14 h./4 min./42 s  
17 Orbits in 10 Tagen

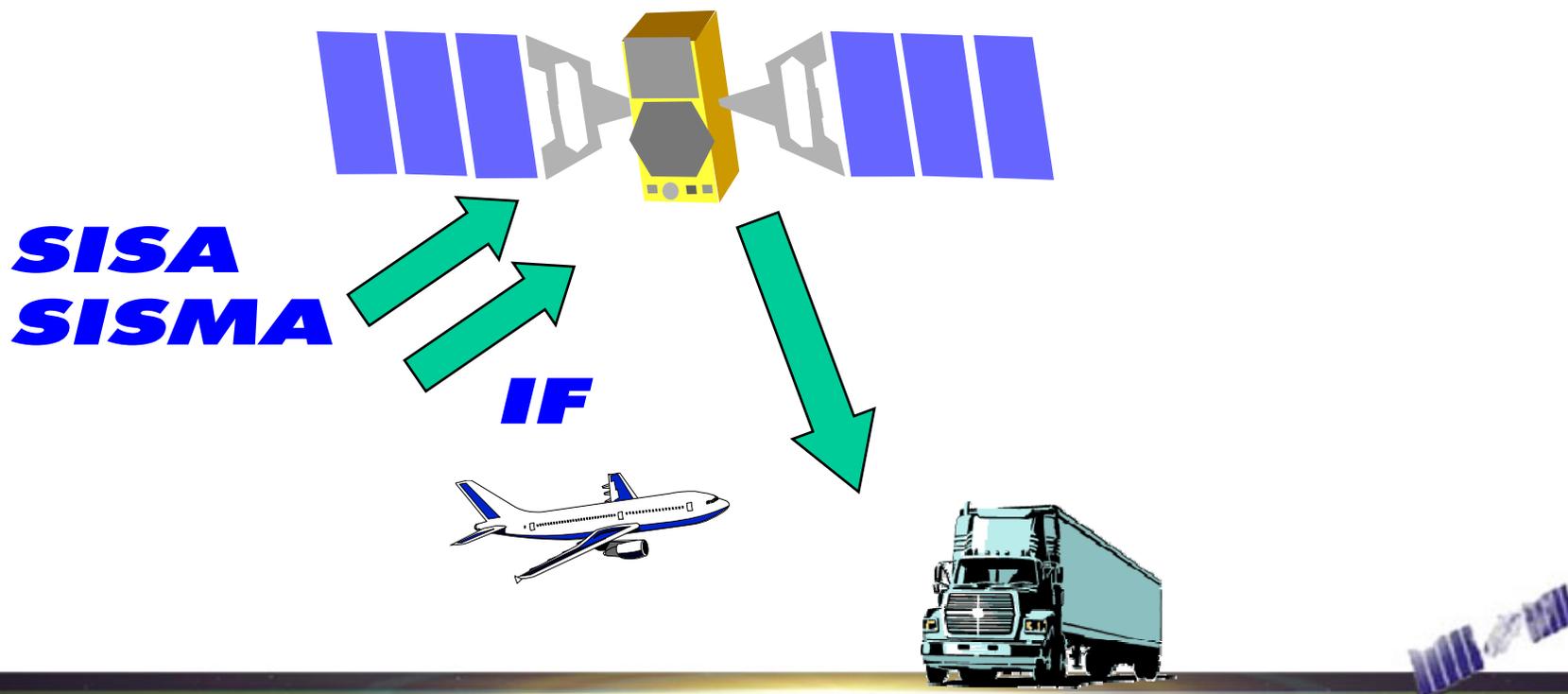




## Servicegarantie mit Galileo

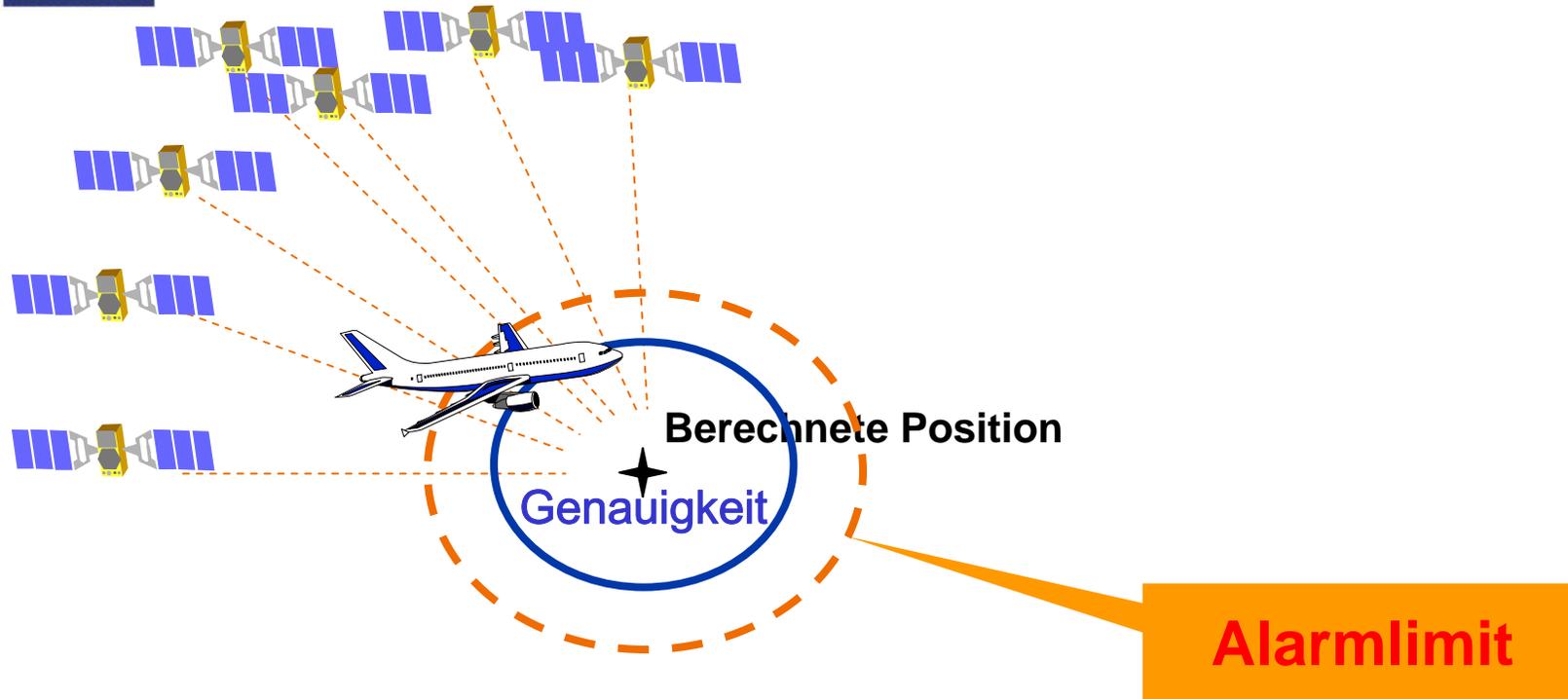


Die Garantie für die Zuverlässigkeit der Galileo Navigationssignale wird durch das **Integritätssignal (Integrity Flag - IF)**, den **Status der Überwachung** des Satelliten durch das Bodensegment (Signal-in Space Monitoring Accuracy – **SISMA**) sowie über die Information über die momentan **erreichbare Genauigkeit** der Navigationssignale (Signal-in Space Accuracy- **SISA**) dem Nutzer in **quasi Echtzeit** mitgeteilt.





## ... wie arbeitet Integrität?

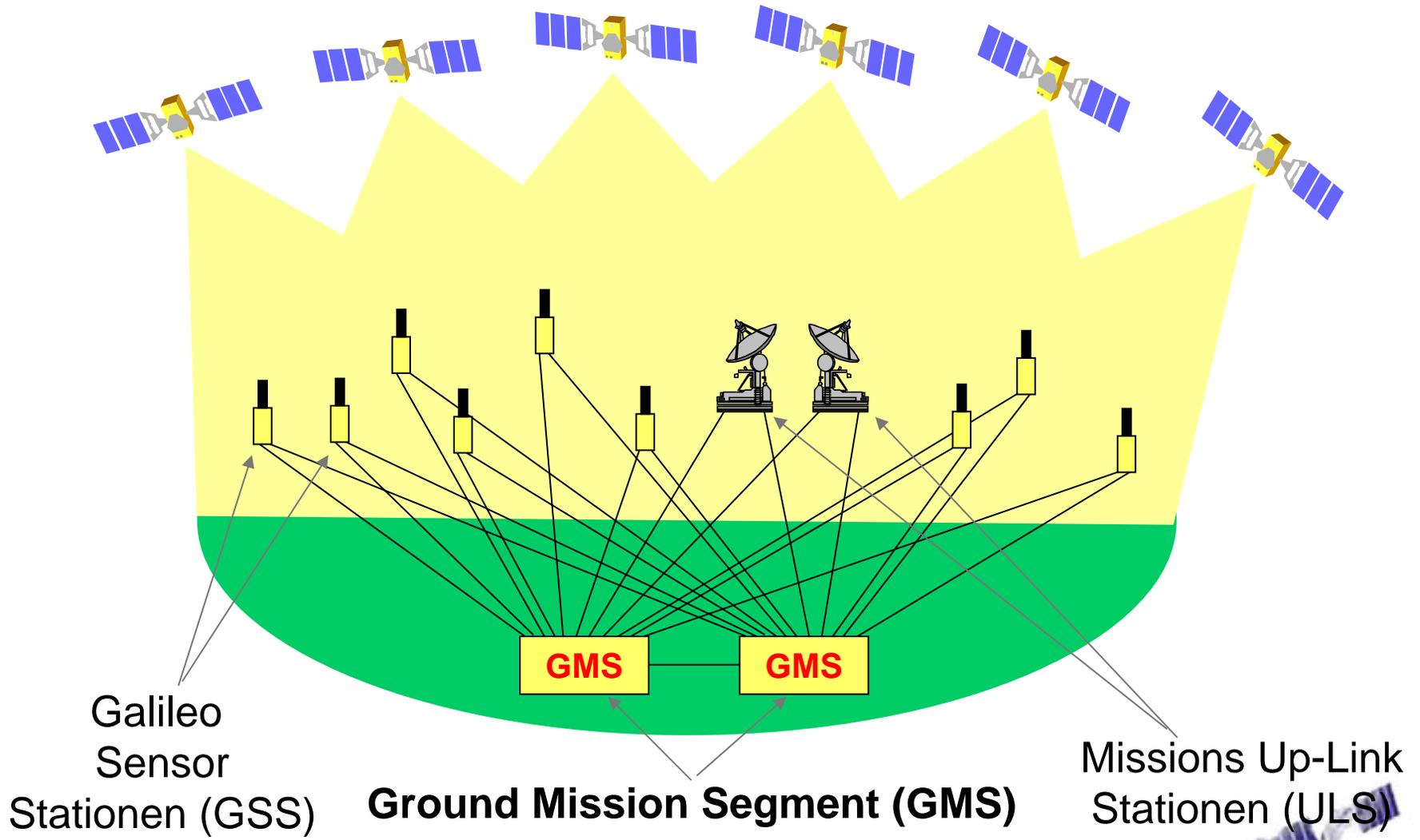


Der **Integritätsprozess** **verifiziert in Echtzeit** und durch ein **unabhängiges System** ob zuverlässige Serviceleistungen erbracht werden können bzw. ob eine **sichere Navigation** vorliegt d.h. ob die berechnete Position und deren Genauigkeit innerhalb eines für den Benutzer **kritischen Alarmlimits** liegt.

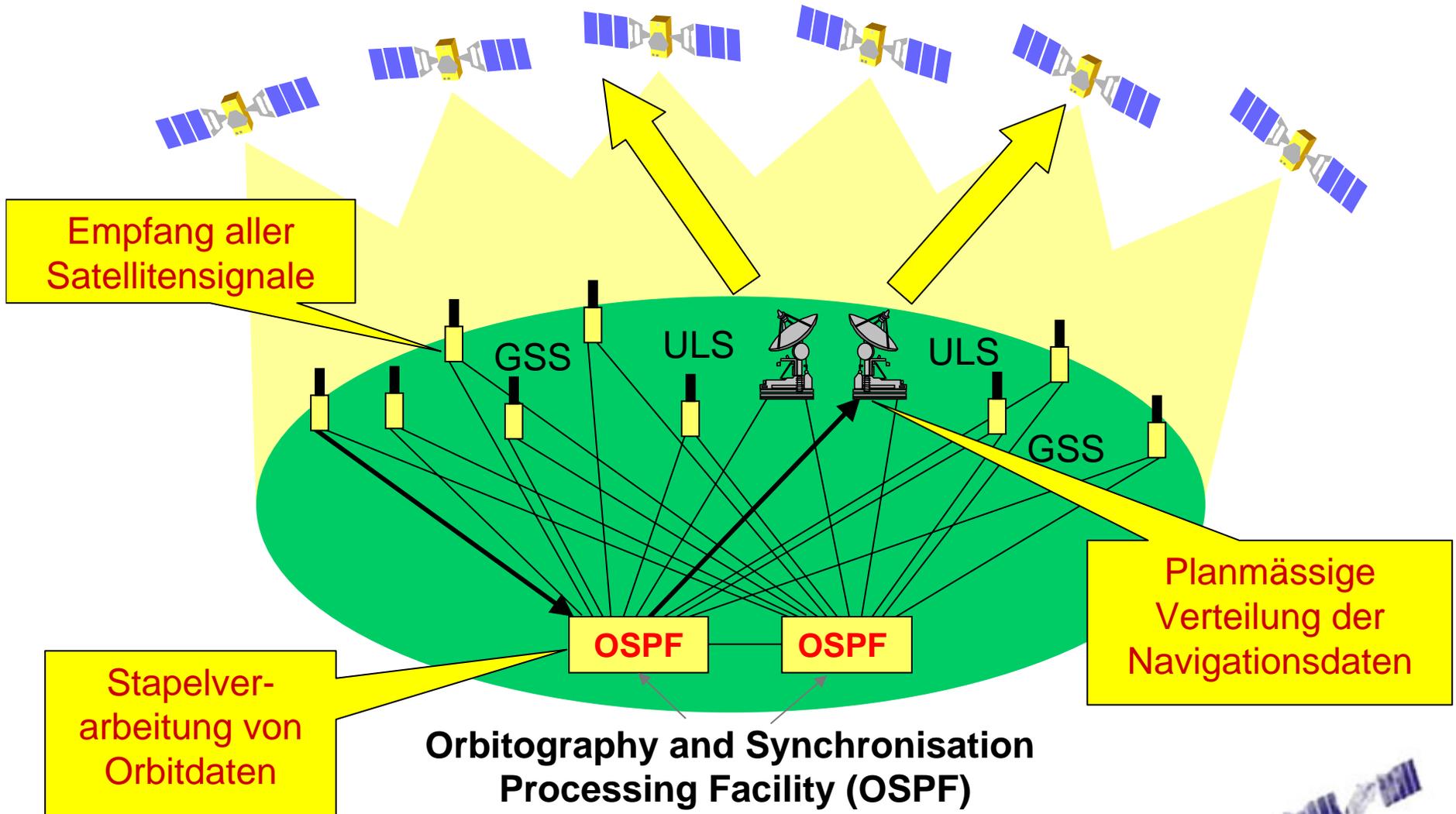




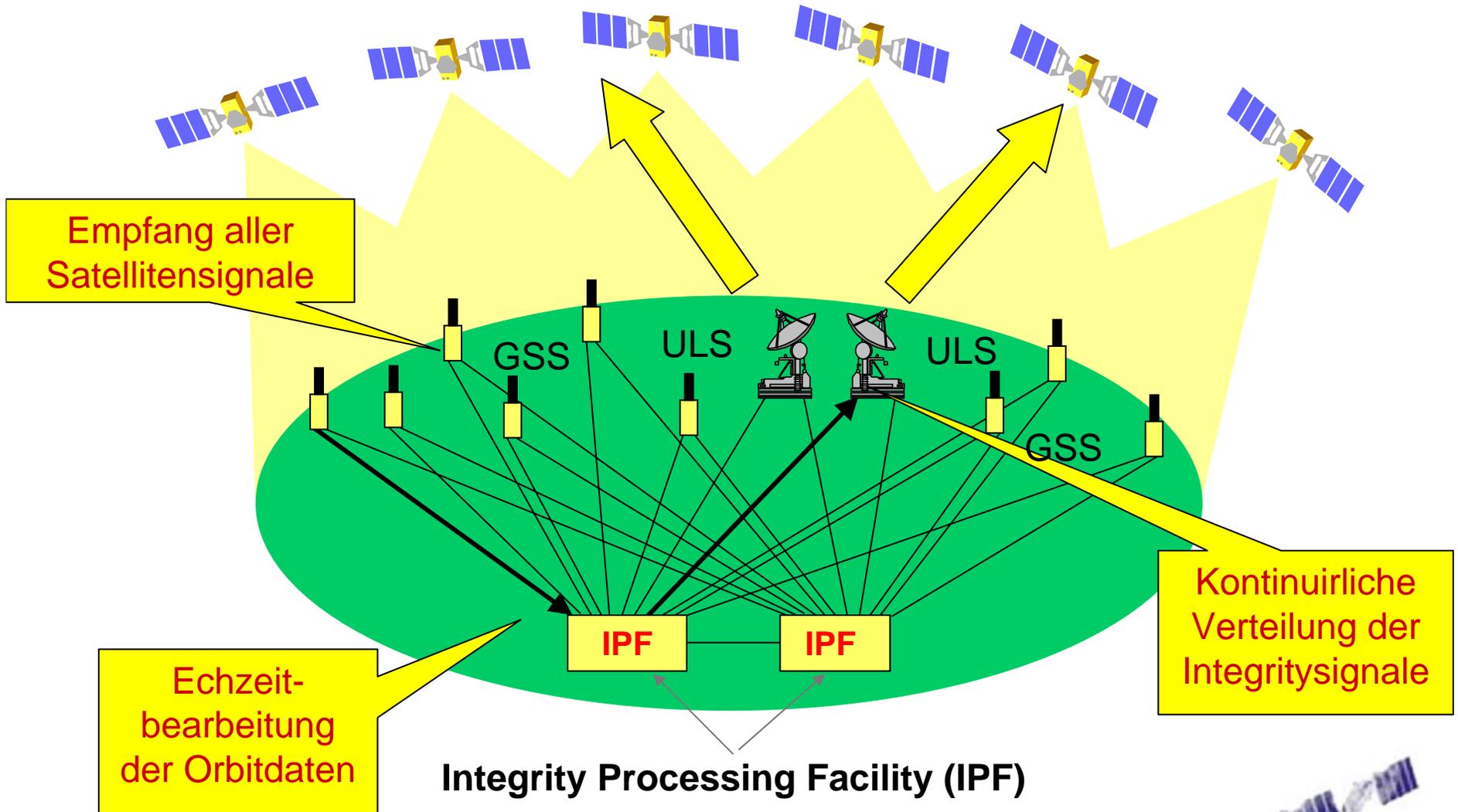
# GALILEO Missions-Bodensegment (GMS)



# Orbitbestimmung & Zeitsynchronisation

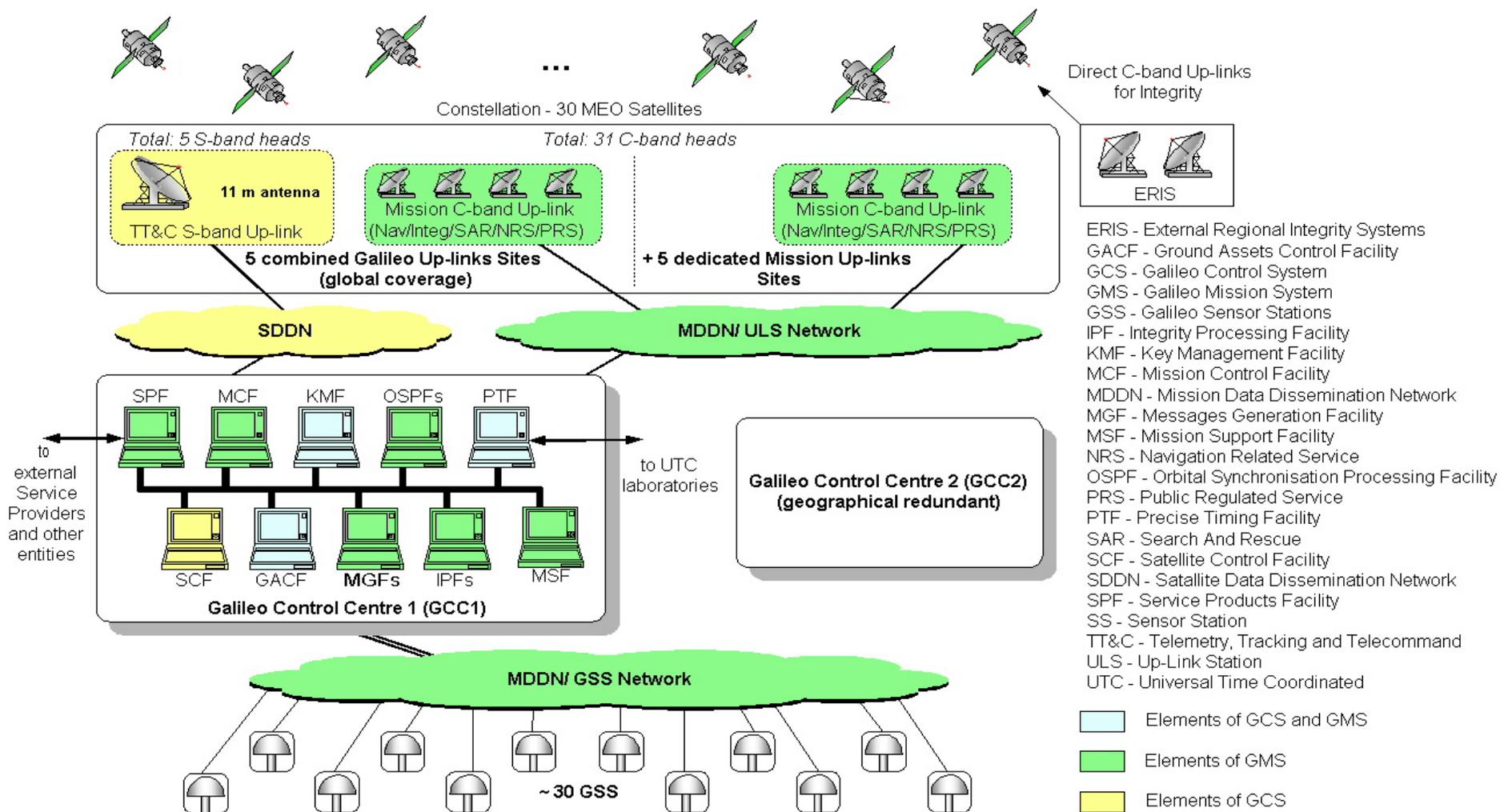


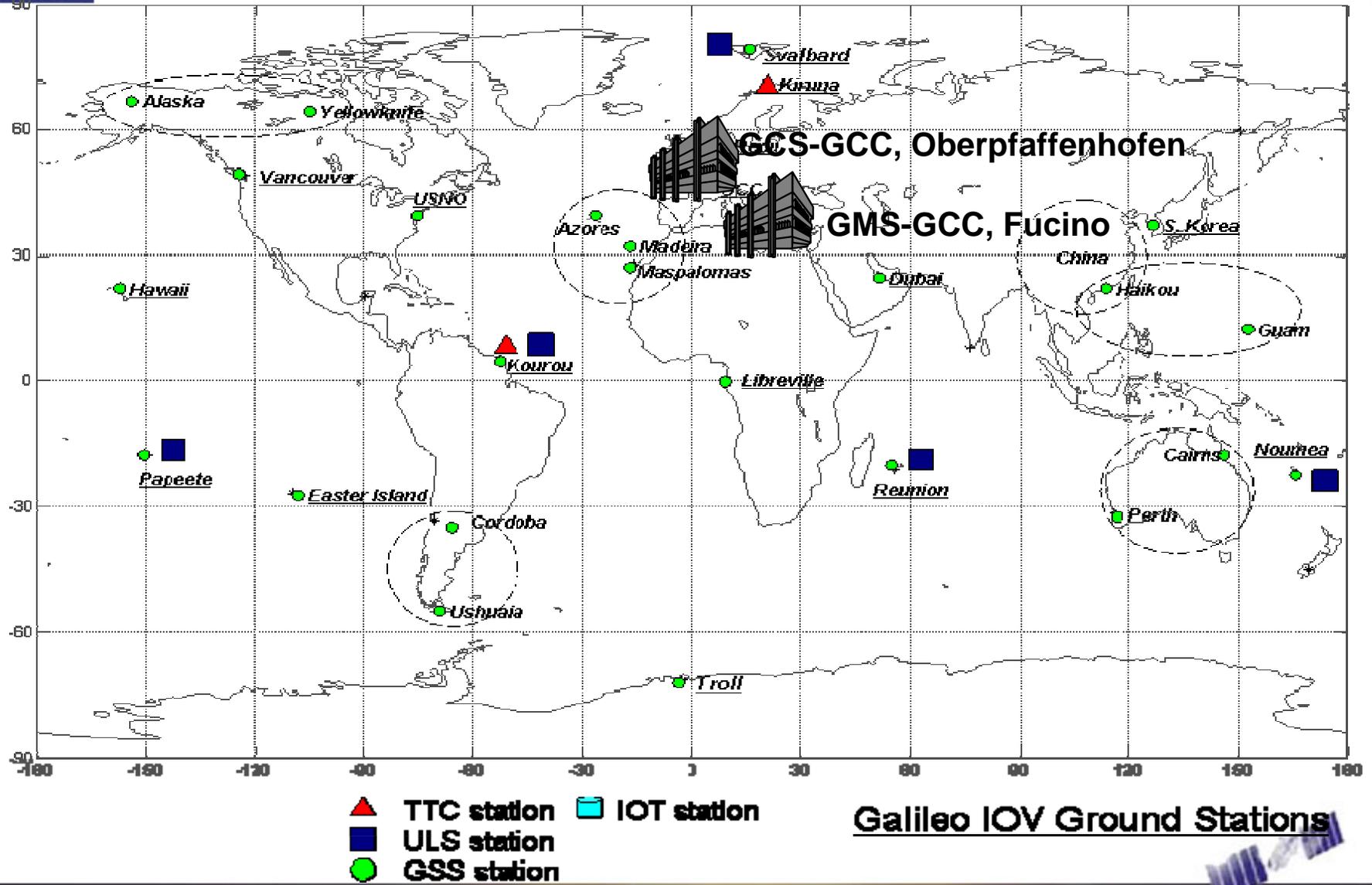
# Integritätsbestimmung





# GALILEO Bodensegment



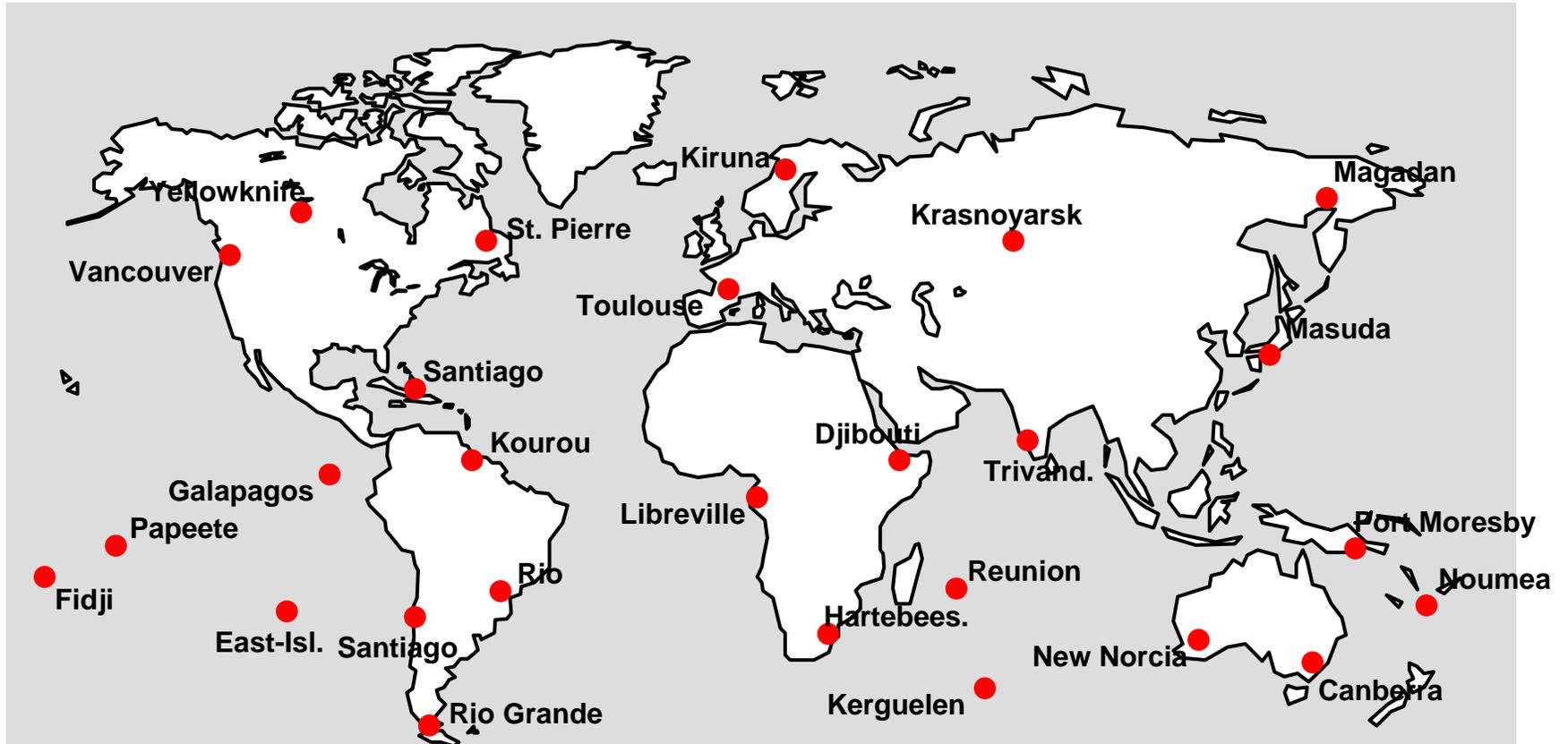


**Galileo IOV Ground Stations**





# Galileo Ground Sensor Stations (GSS)

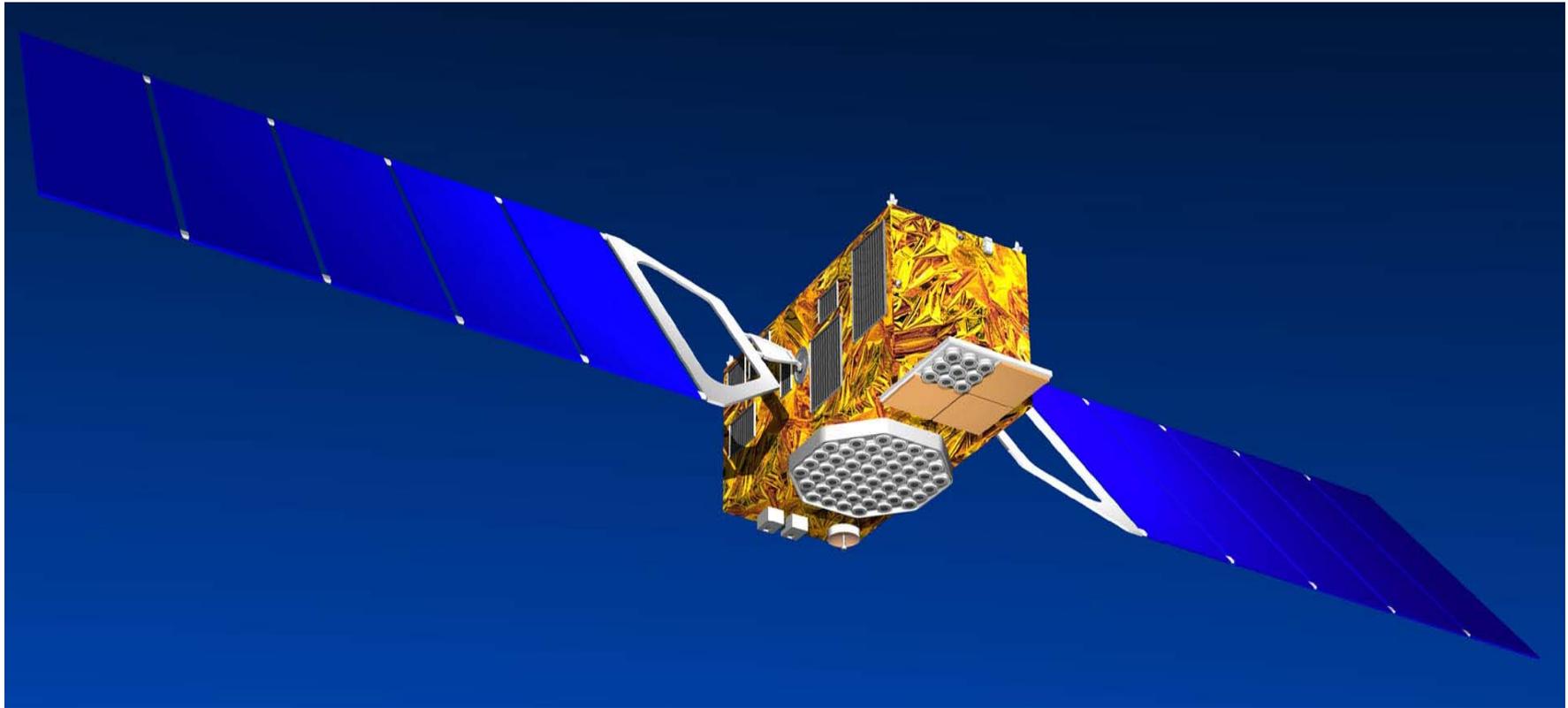


Note.: Utilization of the locations is matter of ongoing assessment





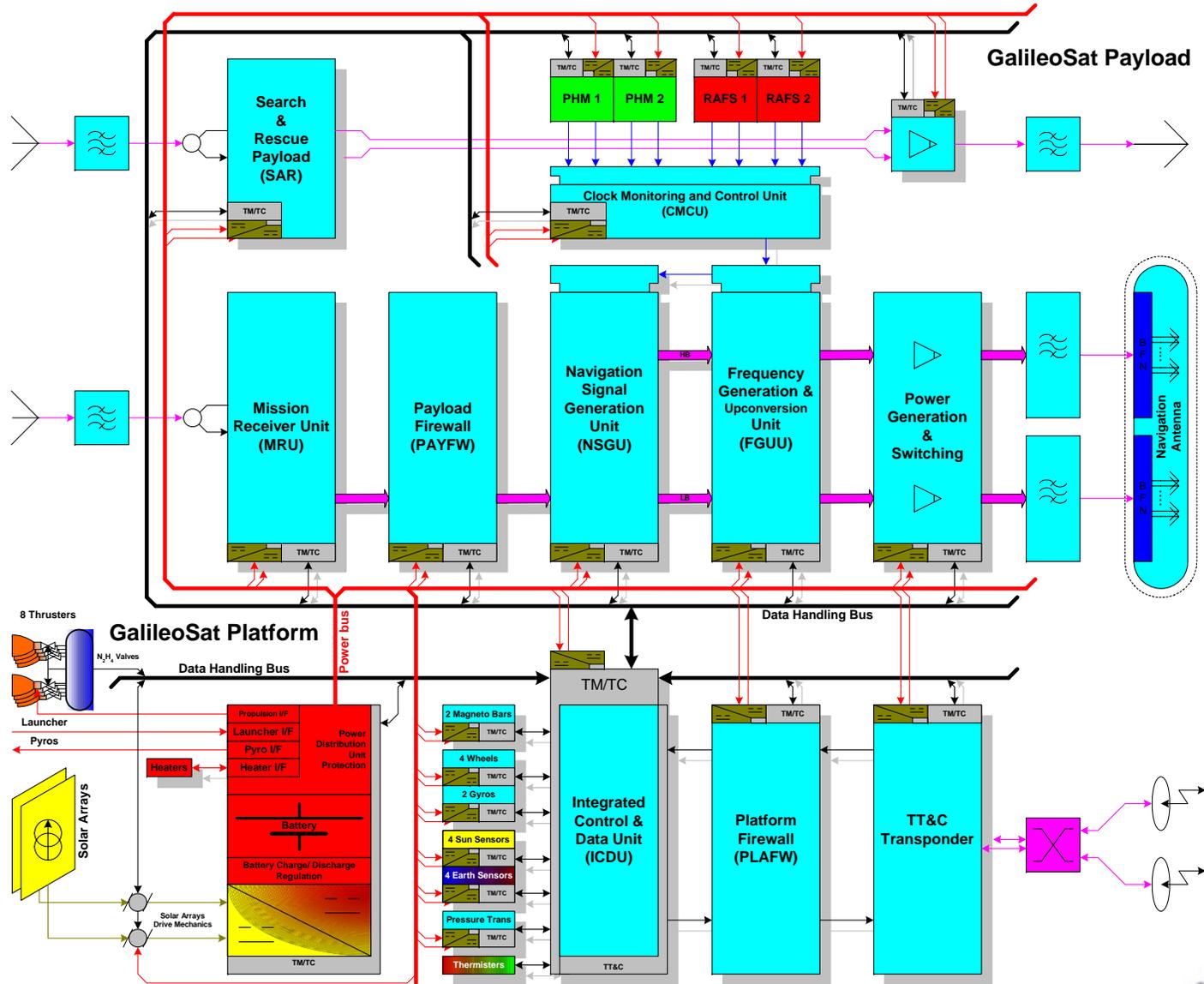
# GALILEO Satellit (IOV)



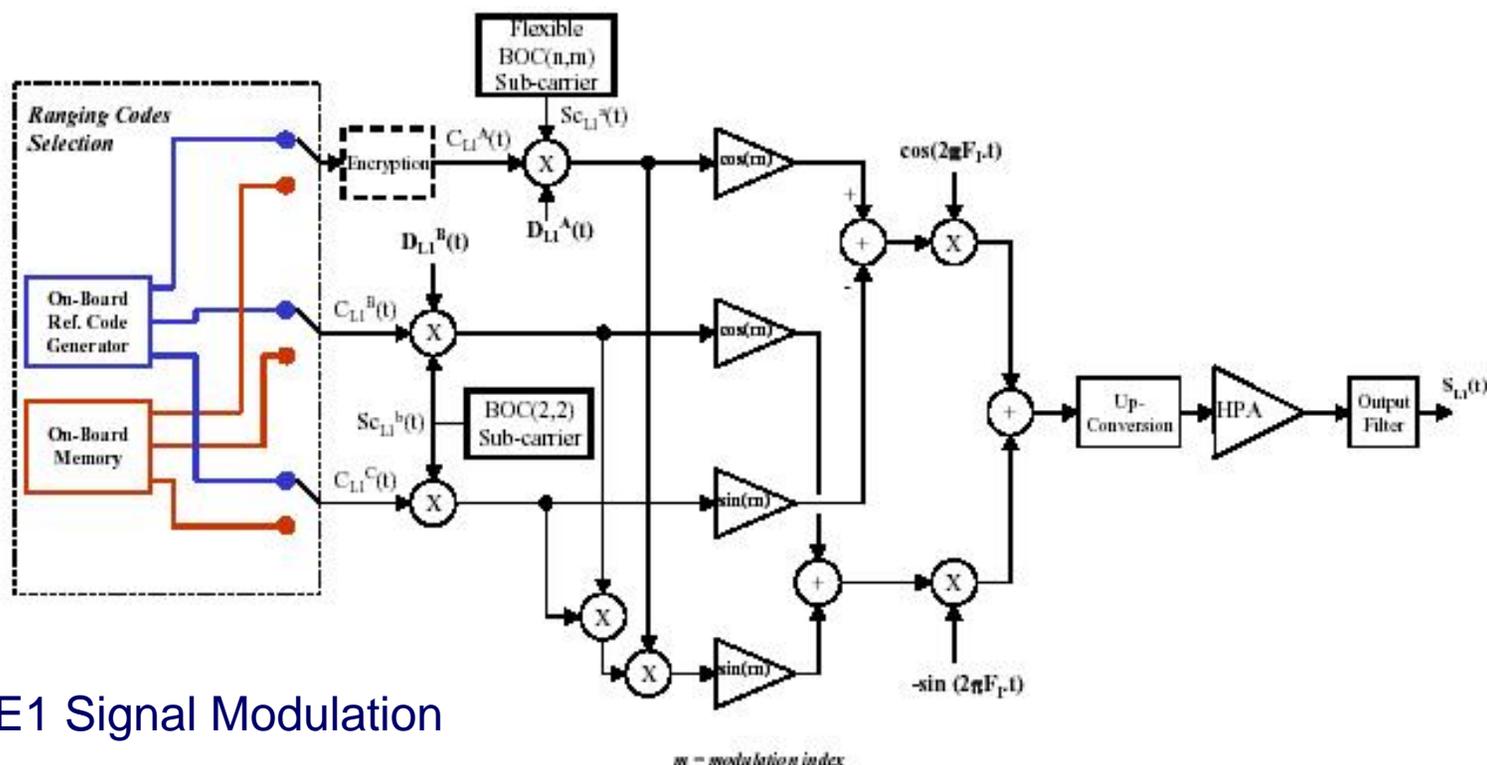
Startgewicht	Ca.680 kg
Stromverbrauch	Ca. 1.6 kW
Abmessungen:	
Satellitenkörper	2700 x 1200 x 1100 mm
Gesamtlänge (Solarpanele ausgeklappt)	13 m
Lebensdauer	12 Jahre



# GALILEO Satellitennutzlast



Der **Navigationssignalgenerator** liefert die **zeitgenauen Navigationscodes**, die dann mit den relevanten **Navigationsdaten kombiniert** werden bevor sie **verschlüsselt, moduliert, frequenzkonvertiert** und schließlich im **Sendeverstärker** auf den entsprechenden **Leistungspegel verstärkt** und **abgestrahlt** werden.



E2-L1-E1 Signal Modulation



# Satellitenuhren



- **Zwei verschieden kritische Uhrentechnologien sind zum Einsatz auf den Galileo Satelliten vorgesehen:**
  - **Kompakte Rubidiumatomuhren**, die auf **kommerzieller Technologie** beruhen wie sie auch in Telekommunikationsanwendungen zum Einsatz kommt. Diese Uhren sind kompakt, preisgünstig und haben eine **gute Kurzzeitstabilität ( $5 \cdot 10^{-14}$  bei 10000 s)**. Allerdings besitzen sie grössere Frequenzschwankungen und eine Drift. Diese Uhren werden bereits auf dem Experimentalsatellit GIOVE-A **erfolgreich geflogen** und getestet. Mit dieser Technologie müssen die Uhrendaten regelmäßig korrigiert werden, was ein weltumspannendes Bodenstationsnetz erfordert (bis zu 40 ULS Antennen).
  - Hochgenaue und gangstabilere **Passive Wasserstoff Maser**. Diese Uhren haben die für die Navigation vorteilhafte **hervorragende Kurz- und Langzeit Frequenzstabilität ( $10^{-15}$ )** besitzen allerdings auch eine Frequenzdrift, die schwer zu charakterisieren ist. Diese Uhren sind größer und schwerer und erfordern eine stabile Temperaturkontrolle im Satelliten. Die Uhren befinden sich momentan in der **Qualifikationsphase** und fliegen zum **ersten Mal auf dem Experimentalsatellit GIOVE-B..**
  - Daneben werden **Caesiumatomuhren** zur Zeit als **Prototypen** entwickelt. Sie haben als **Primärstandard** eine **sehr gute Langzeitstabilität ( $10^{-14}$ )** allerdings auch bedingt durch den Cäsiumverbrauch eine kürzere Lebensdauer. Cäsiumatomuhren werden als Zeitreferenz im Bodensegment benötigt.

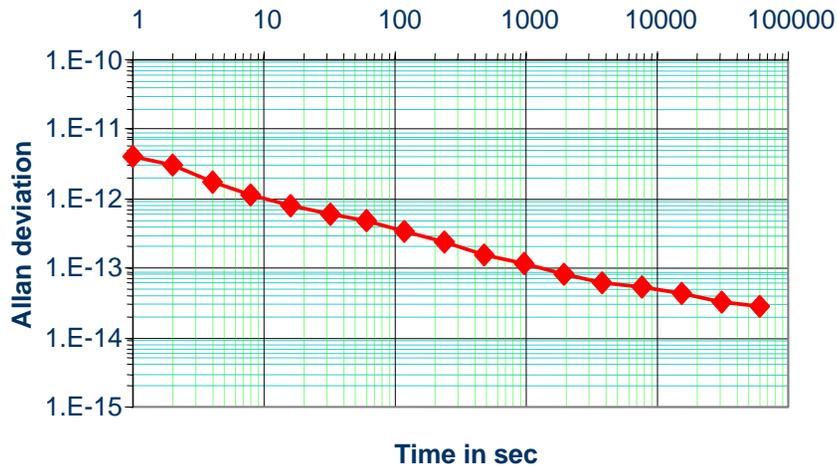


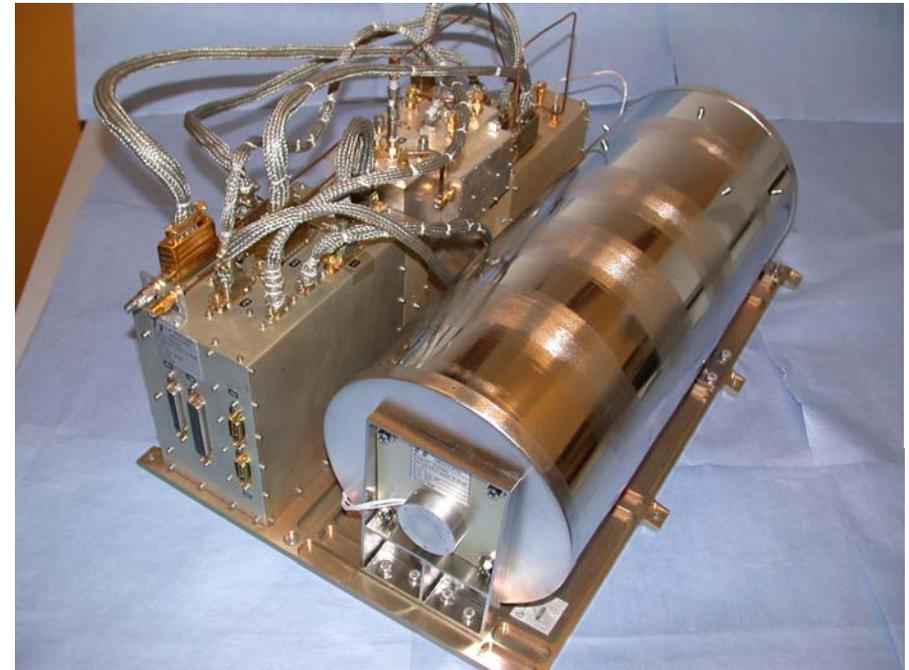
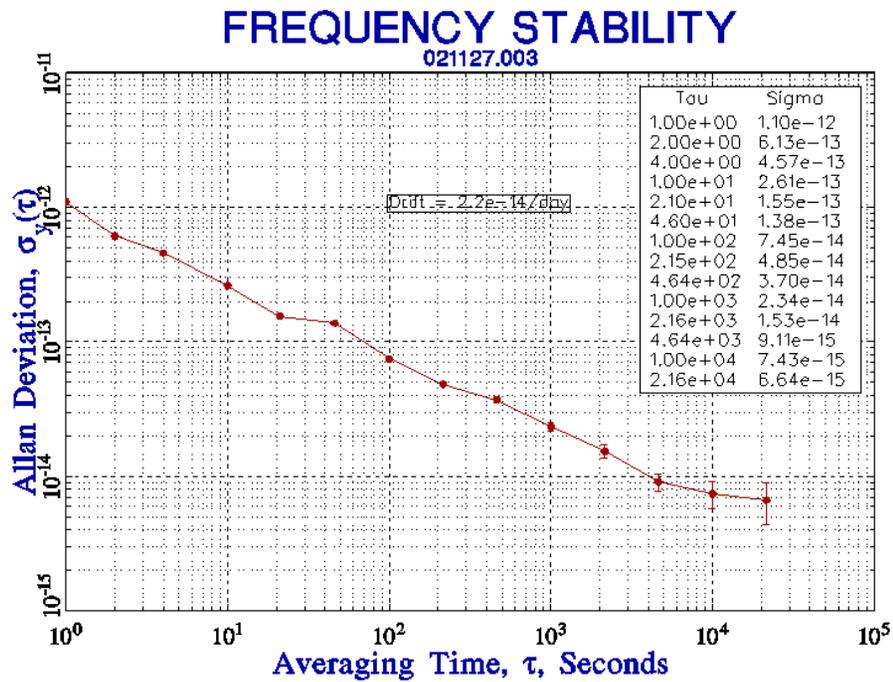


# Rubidium Atom Frequenzstandard (RAFS)



Rubidium Atomuhr  
3.5 Kg Masse  
30 W Leistung



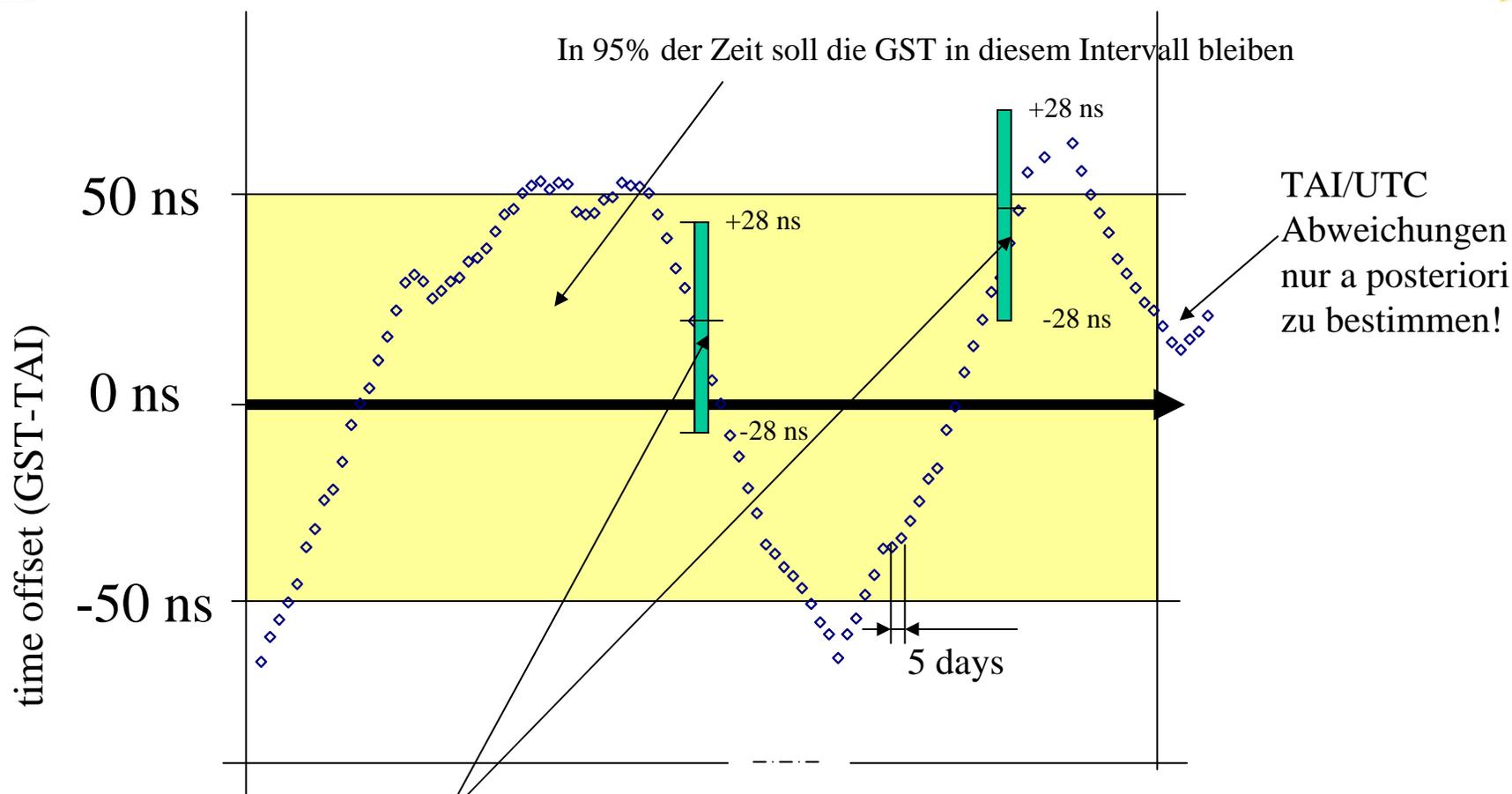


Passiver H-Maser  
15 Kg Masse  
70 W Leistung





# Galileo Systemzeit (GST) im Vergleich zur Atomuhrenzeit (TAI) und UTC

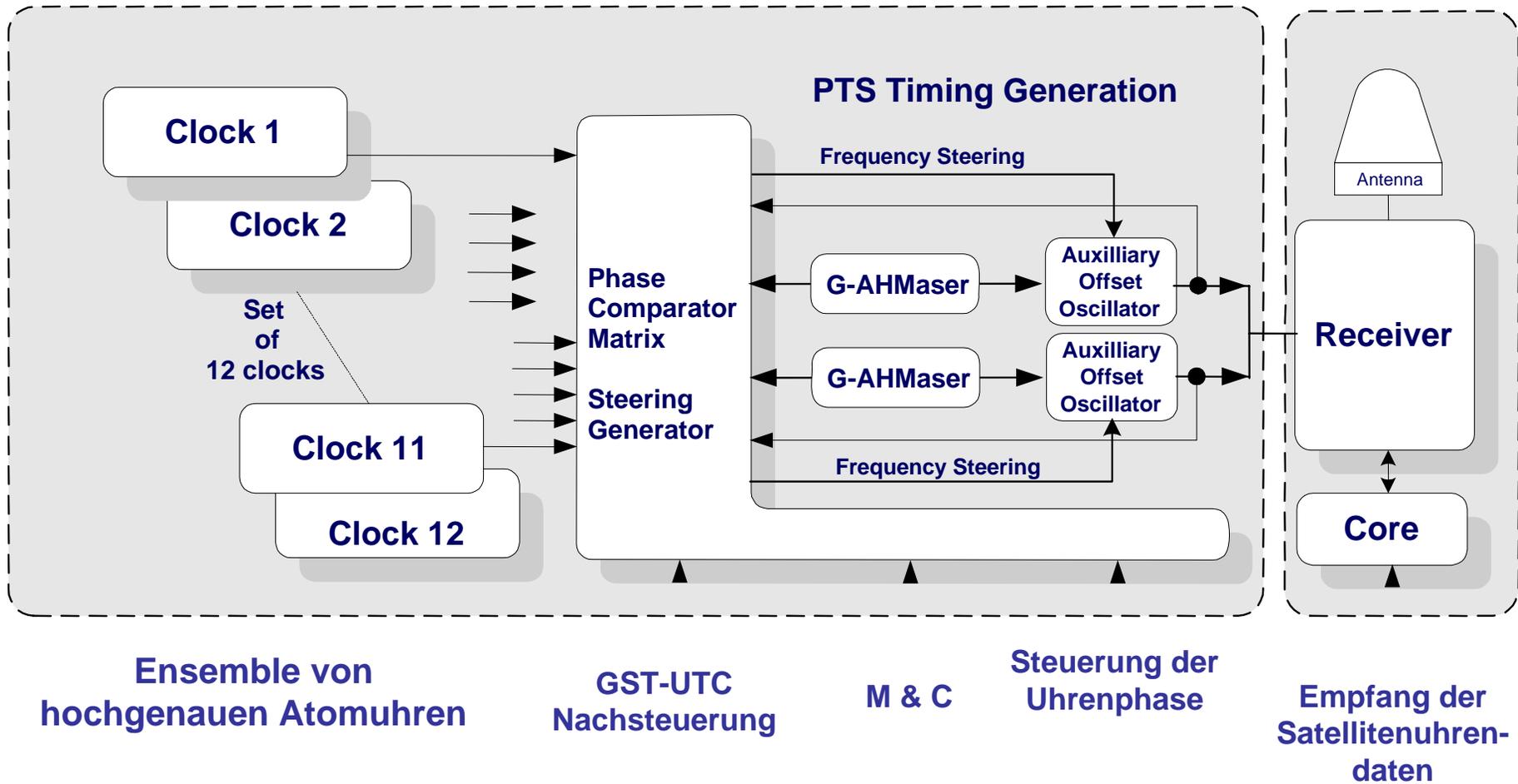


Die vorhergesagte Abweichung darf  $\pm 28$  ns nicht überschreiten um mit der Systemzeit im angestrebten Genauigkeitsintervall von  $\pm 50$  ns in 95% aller Zeitintervalle zu bleiben.

UTC Abweichungen werden erst ca. 1.5 Monate später erkennbar



## Konzept der Precision Timing Facility (PTF) – Keyser Trede (München)





# Relativistische Uhreneffekte



**Relativistische Effekte** sind beim Vergleich zweier an verschiedenen Orten und Bezugssystemen befindlichen Uhren von Bedeutung (z.B. Satellitenuhr und Empfängeruhr):

Alle zu synchronisierende Uhren müssen in ein **fixes Inertialsystem mit einer Systemzeit** überführt werden, z.B. in ein geozentrisches System ECI.

**Unterschiedliche Gravitationsfelder** haben Auswirkungen auf die Uhrenzeit und gemessene Zeiten müssen auf eine **einheitlich Äquipotentialfläche** des Erdschwerepotential **transformiert** werden, z.B. auf den Geoid auf den die SI-Sekunde definiert ist. Dies muss durch ein **Geoid-Modell im Navigationsempfänger** korrigiert werden.

Die **Zeitdilatation (Dopplereffekt 2. Ordnung)** aus der Speziellen Relativitätstheorie besagt, dass eine **bewegte Uhr gegenüber einer ruhenden langsamer** geht. Dies kann durch Modellierung im Navigationsempfänger korrigiert werden ca +50 $\mu$ s/Tag (GPS)

Die **Gravitationsrotverschiebung** aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ist zu beobachten wobei eine **Uhr auf einem niedrigerem Gravitationspotential vergleichsweise schneller** geht als eine auf höherem Potential. Dies wird **vorab durch Frequenzreduzierung** des Hauptoszillators für das Satellitennavigationssignal korrigiert, z.B. -4,55 MHz von 10.23 MHz bei GPS.

**Sagnac-Effekt**, der beschreibt, dass beim Transport einer Uhr auf einer rotierenden Scheibe im Gegensatz zu einer Uhr in einem nichtrotierendem System eine **relativistische Zeitablage** auftritt. Die muss beim Transport von Uhren zum Zwecke der Synchronisation beachtet werden und muss bei der Zeitmessung in einem Satellitennavigationssystem berücksichtigt werden (+/- 60 ns bei GPS).





## Galileo & GPS – zuverlässigere und genauere Satellitenkommunikation

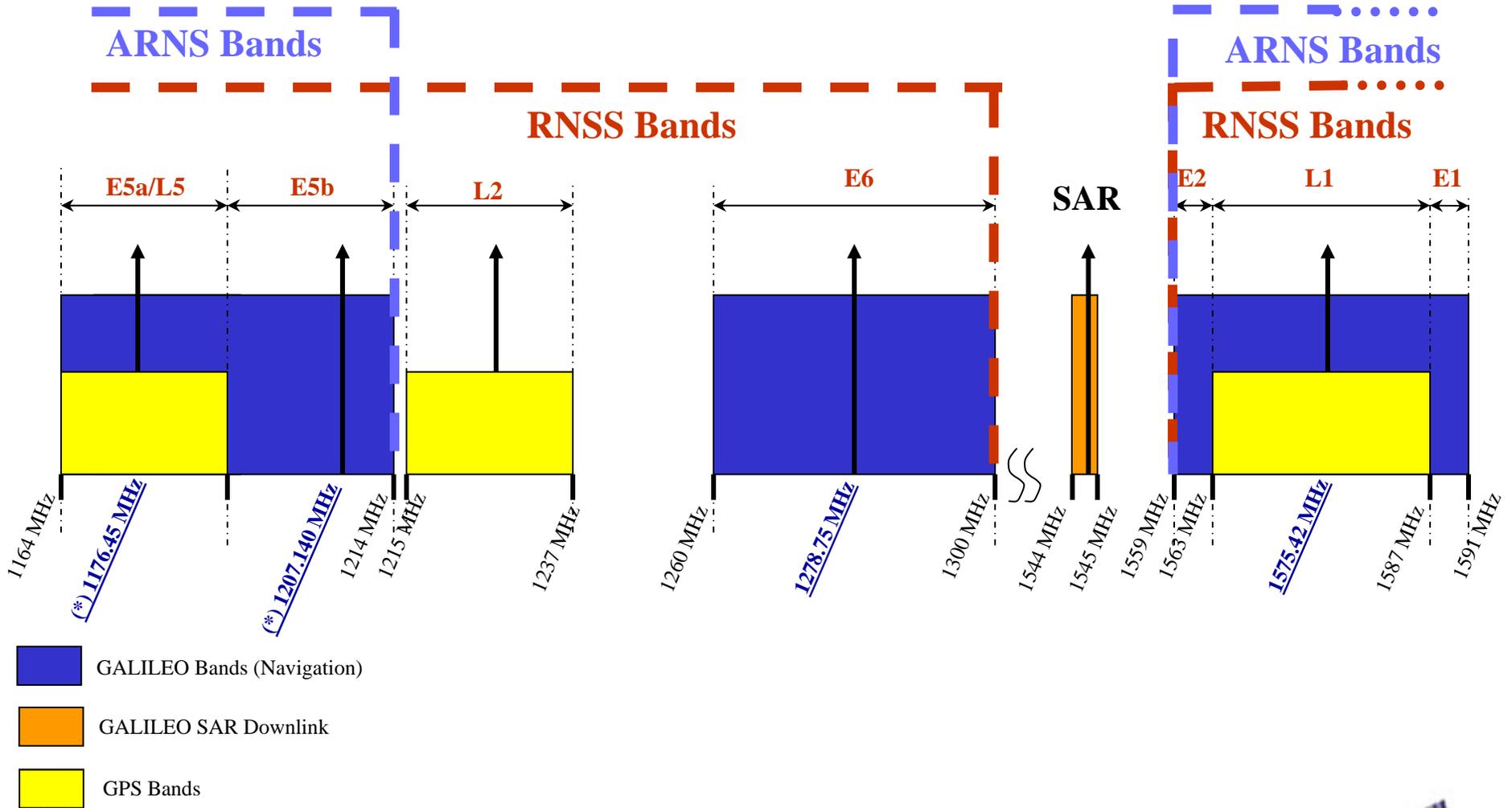


- Durch Kompatibilität:
  - Nutzer können **Galileo & GPS Signal zusammen empfangen** und auswerten. Damit „sehen“ die Nutzer mehr Satelliten als mit einem System allein, was sich insbesondere in kritischen Situation bewährt.
- Erhöhte Verfügbarkeit
  - Galileo stellt **weltweit** zuverlässige Navigationssignale für den **freien Zugang** zur Verfügung und ist hierdurch ebenso wie GPS weltweit nutzbar.
- Erhöhte Zuverlässigkeit
  - Galileo stellt ein **unabhängiges Überwachungssystem** (Integrity) bereit und ermöglicht so die **zuverlässige und schnelle Warnung** der Nutzer falls es Probleme mit dem System geben sollte.



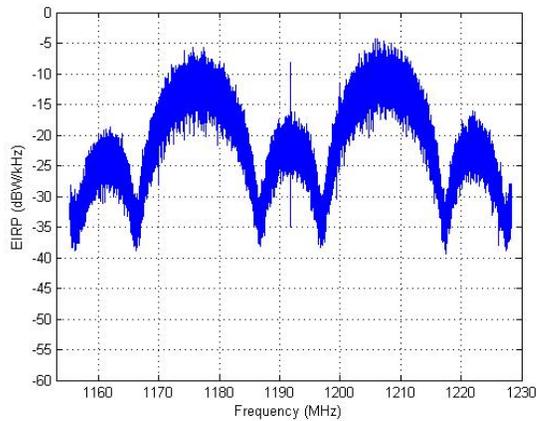


# GALILEO Frequenzplan, L-Band

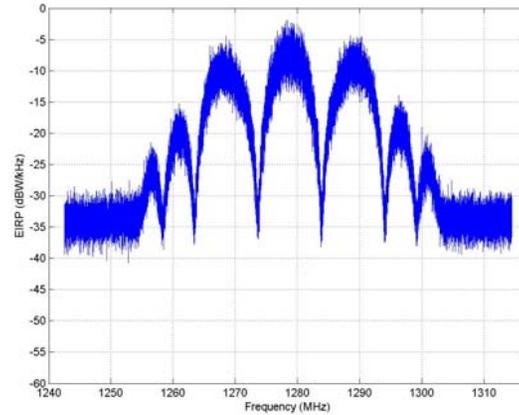




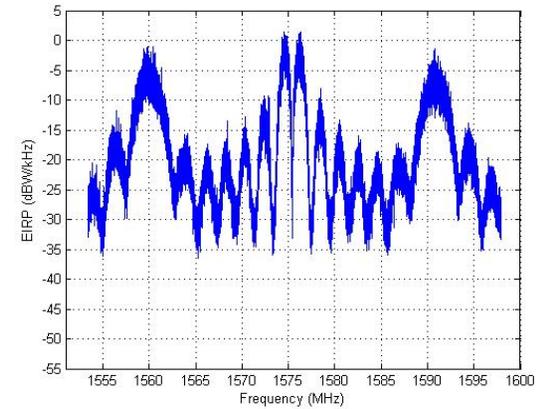
# Galileo Signale von GIOVE-A



Spektrum des E5  
ALTBOC Signals



Spektrum des E6  
Interplex Signals



Spektrum des  
E2L1E1 Interplex  
Signals





## Galileo Experimentalsatelliten & Kritische Technologien



Mit **GIOVE-A1 (gebaut von SSTL, UK)** fliegt seit Januar 2006 der erste Europäische Navigationssatellit in einem Galileo (MEO) Orbit und belegt das für **Galileo zugewiesene Frequenzband**.

GIOVE-A1 demonstriert erfolgreich **kritische Satellitentechnologien** und Nutzlastelement, u.a. den **Navigationssignalgenerator**, die **Navigationssantenne** und die **Rubidium Atomuhr**. Mittlerweile wurde ein zweiter Experimentalsatellit (GIOVE-A2) bei SSTL in Auftrag gegeben der Mitte 2008 zur Verfügung stehen könnte.

Mit **GIOVE-B (entwickelt vom Europäischen Industriekonsortium ESNIS)**, der seit April 2008 fliegt, werden **weitere kritische Technologien** geflogen, u.a. die **H-Maser Uhr**, die stabilste Uhr die jemals im Weltraum betrieben wurde. Hierfür wird auch das **Kontrollsegment** entwickelt und aufgebaut. GIOVE-B sichert die **Kontinuität** der Europäischen Satellitennavigationsentwicklung.

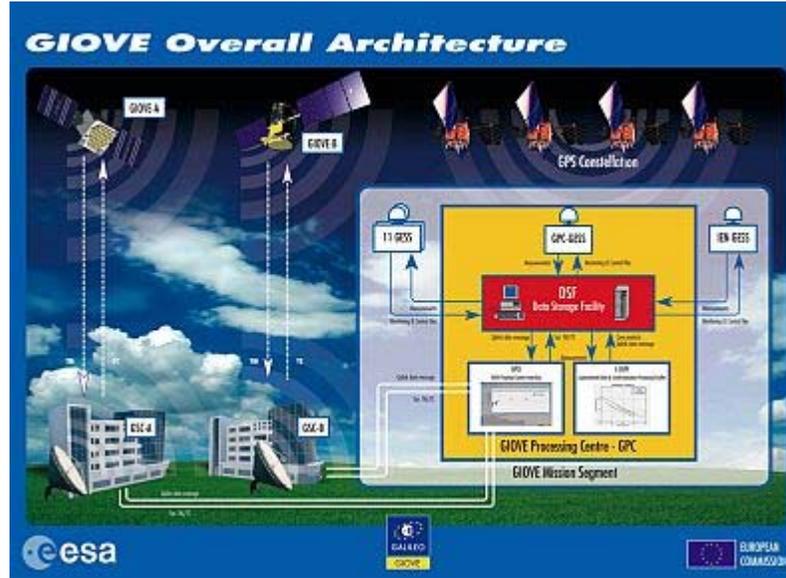
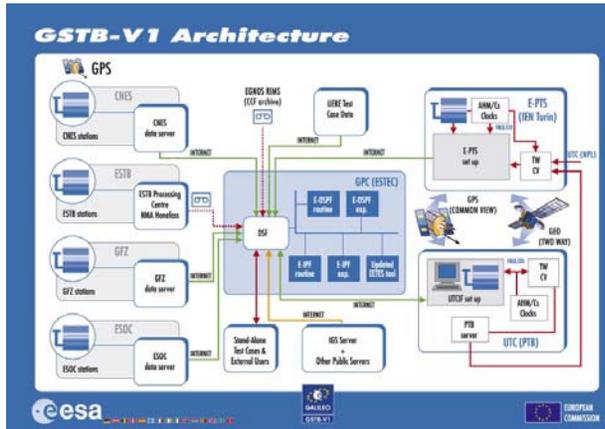
Parallel hierzu entwickelt und betreibt die ESA alle wichtigen **Komponenten des Missionssegments**, u.a. alle Einrichtungen zum **Prozessieren der Navigations- und Integritätsdaten** sowie die Entwicklung von **Galileo-Empfängern**.





System Testbed V1

# Beispiele kritischer Systemkomponenten entwickelt durch ESA



On-board Signalgenerator



On-board TTC Transponder



Sensor Antenne



Exp. Galileo-Empfänger



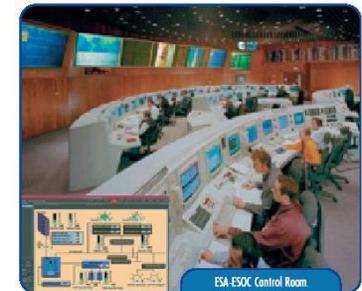
Exp. Galileo-Empfänger



On-board CMCU

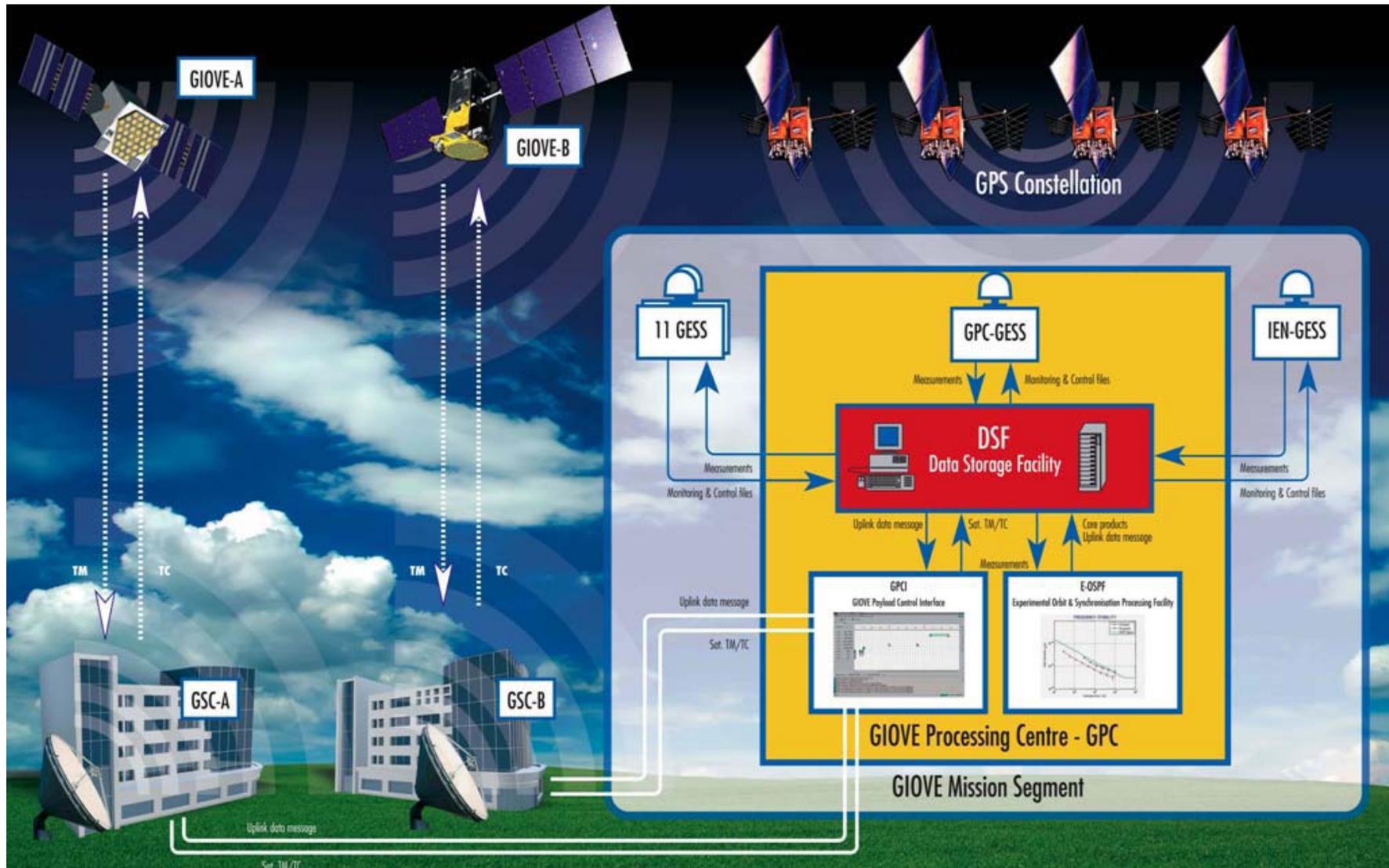


Signal Simulator



Missionskontrollsystem

# Galileo (GIOVE) Test Bed Architecture





# Galileo Service Anforderungen



Signal	Service	Position Accuracy (horizontal, 95%)	Position Accuracy (vertical, 95%)	Availability of Accuracy
L1	OS, SoL	15	35	99.5%
E5a	OS, SoL	24	35	99.5%
E5b	OS, SoL	24	35	99.5%
E5a + L1	OS, SoL	4	8	99.5%
E5b + L1	OS, SoL	4	8	99.5%
L1	PRS	15	-	99.5%
E6	PRS	24	35	99.5%
E6 + L1	PRS	6.5	12	99.5%

Signal	Service	Time Accuracy	Availability of Accuracy
E5a + L1	OS, SoL	30ns for 95% of any 24 h	99.5%
E5b + L1	OS, SoL		

**4m/8m  
Navigationsgenauigkeit  
in 99.5% der Zeit**

Signal	Service	Frequency Accuracy	Availability of Accuracy
E5a + L1	OS, SoL	$3 \times 10^{-13}$ (2-sigma)	99.5%
E5b + L1	OS, SoL		

**30ns Zeitgenauigkeit in  
99.5% der Zeit**

