

GALILEO: Von der ersten zur zweiten Generation

Galileo: From the first to the second Generation

Bernd Eissfeller

Zusammenfassung

Das Europäische Satellitennavigationssystem Galileo wird seit rund 20 Jahren entwickelt. Im Jahr 2012 wurde ein »Re-Profiling« bei der ersten Generation (G1G) vorgenommen. Als Folge davon haben sich einige Dienste und viele technische Eigenschaften verändert. Einige Neuerungen, z.B. der kostenfreie hochgenaue Dienst (High Accuracy Service – HAS), sind für Geodäsie, Vermessung und die präzise Navigation sehr interessant. Es ist von daher für die Anwender von Galileo durchaus nicht einfach, auf dem neuesten Stand zu sein und die richtigen Entscheidungen bezüglich der zu nutzenden Signale und Dienste zu treffen. Die Lage wird weiter noch dadurch unübersichtlicher, dass seit 2015 bereits die zweite Generation (G2G) entwickelt wird, die zusätzliche Erweiterungen gegenüber G1G bieten soll. Die Motivation für diesen Beitrag besteht darin, den Nutzern aus Geodäsie und Vermessung einen Überblick über den derzeitigen Entwicklungstand von Galileo zu geben.

Schlüsselwörter: Galileo, G1G, G2G, Modernisierung

Summary

The European Satellite Navigation System Galileo is under development for more than 20 years. In 2012, a re-profiling of the 1st generation (G1G) happened. Consequently, many services and technical characteristics were changed. For example, a High Accuracy Service (HAS) is implemented which is very interesting for geodesy, surveying and precise navigation. Additionally, the 2nd generation of Galileo (G2G) is under development since 2015. Therefore, it is not easy for the user communities to be up-to-date on all services and signals of Galileo. The motivation of this paper is to provide an overview about the status of Galileo.

Keywords: Galileo, G1G, G2G, modernization

1 Einführung

Die Entwicklung des Europäischen Satellitennavigationssystems Galileo begann im Jahr 1999 nach einigen Vorstudien mit der bekannten Kommunikation der Europäischen Kommission (EC) über den Aufbau von Galileo. Nach mehr als 20 Jahren Projektdauer sind nun 22 operationelle Satelliten der ersten Generation (G1G) verfügbar. Insgesamt sind 26 IOV (In-Orbit Validation) und FOC (Full Operational Capability)-Satelliten im Orbit (vier Satelliten sind aufgrund von alterungsbedingten und technischen Problemen nicht verfügbar). Hinzu kommen zwei neue FOC-Satelliten, die am 5.12.2021 mit einem Sojus Launch

in den Orbit gebracht wurden (derzeit in der Inbetriebnahme). Wir werden demnächst dann 28 G1G-Satelliten im Orbit haben. Somit wird im Jahr 2022 die Erklärung der FOC für den Offenen Dienst (OS) erwartet, nachdem der Initial Service (Probephase) bereits 2016 erklärt wurde. Nach der schweren Finanzierungskrise 2007 (Scheitern des Public Privat Partnership) wurde entschieden, den Aufbau von Galileo öffentlich zu finanzieren (Paradigma der öffentlichen Infrastruktur). Im Jahr 2012 begann als Folge ein »Re-Profiling« bei G1G, da aus Kosten- und Aufwandsgründen eine Verschlankung des Systems vorgenommen werden musste. Im Zuge dieser Anpassungsaktivitäten wurden Veränderungen am ursprünglichen Dienste-Konzept vorgenommen. Dies führte über die letzten zehn Jahre dazu, dass Galileo G1G heute bereits weitgehende modernisierte Eigenschaften besitzt, die durchaus zu einem Systemvorteil gegenüber dem amerikanischen GPS und dem chinesischen Beidou führen. Einige dieser Neuerungen sind auch für Geodäsie und Vermessungswesen, öffentliche Anwendungen von GNSS im Bereich BOS (Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben) und die kritische Infrastruktur in Europa relevant. Gleichermaßen gilt selbstverständlich auch für die vielfältigen kommerziellen Anwendungen von PNT (Positioning, Navigation & Timing). Obwohl 2015 die erste Generation noch nicht fertiggestellt war, musste man in Europa insbesondere im Hinblick auf die begrenzte Lebensdauer des Raumsegments (12 Jahre) an das Nachfolgesystem denken. Seit 2015 läuft somit die offizielle Definitions- und Entwicklungsphase der zweiten Generation von Galileo (G2G). Es ist geplant, dass der erste G2G-Satellit 2024 ausgeliefert wird. Ab diesem Zeitpunkt wird dann Schritt für Schritt das Galileo-Raumsegment bis 2030+ erneuert.

2 Zum Stand von G1G-Raum-, Boden- und Nutzersegment

Das ursprüngliche Konzept von Galileo, das bis 2012 verfolgt wurde, haben wir in Schüler et al. (2009) beschrieben. Das Re-Profiling in 2012 und die Folgeentwicklungen haben zu einer Vereinfachung der Galileo-Dienste geführt. Auch wurde die Anzahl der Strukturelemente im Raum- und Bodensegment erheblich reduziert. Als wesentliches Element kam hinzu, dass das institutionelle Management (Galileo Governance) gestrafft wurde. Durch die Invasion Russlands in die Ukraine und die aufgelegten Sanktionspakete der EU ist im Moment unklar, wie mit den beiden im

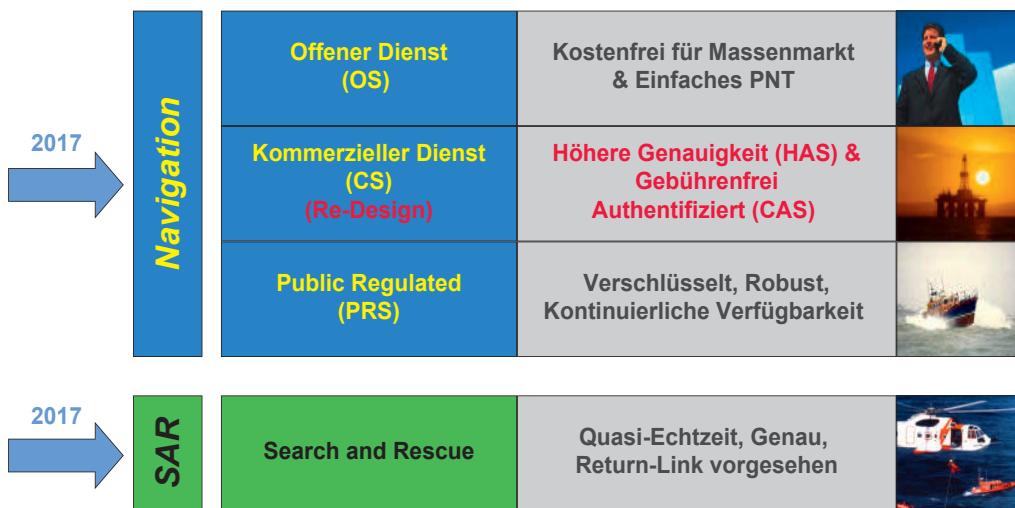


Abb. 1:
Konzept der Galileo-Dienste nach Re-Profilung (nach 2012)

Jahr 2022 geplanten Sojus-Starts verfahren werden kann. Der für April 2022 geplant Start wurde abgesagt. Von daher können sich alle geplanten Termine für 2022+ bei Galileo verschieben.

2.1 Angepasstes Dienste-Konzept und Signale

In Abb. 1 ist das derzeitige Dienste-Konzept der ersten Generation von Galileo (G1G) dargestellt. Es ergeben sich zwei wesentliche Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Ansatz: Die Hauptänderung geht aus der Entscheidung hervor, den geplanten und sehr ambitionierten Safety-of-Life (SoL)-Dienst nicht zu implementieren. Das Ziel des SoL-Dienstes bestand darin, eine sehr schnelle Information (Warnzeit < 10 s, Warnschwelle = 4 bis 6 m Vertikal) über den Verlust der Integrität von einzelnen Satelliten an den Nutzer (global) zu übermitteln. Der SoL stellte sehr hohe Anforderungen an das Monitoring der Konstellation mit bis zu 40 Galileo-Sensor-Stationen (Empfänger) weltweit, an die globale Daten-Kommunikation und die Auswerte-Algorithmen in den Kontrollzentren. Eine zweite wichtige Änderung, die seit 2012 entwickelt wurde (Re-Design), bestand darin, den ursprünglichen Kommerziellen Dienst neu auszustalten.

Die G1G-Signale (spektrale Leistungsdichten in W/Hz über Frequenzachse in MHz) haben sich seit 2007 nicht

verändert. Der Vollständigkeit halber ist nochmal Abb. 2 aus Schüler et al. (2009) zur Orientierung übernommen.

Zu einer genaueren Beschreibung der Signale sei auf Avila-Rodriguez et al. (2007) und auf die neueste Version des Galileo SIS-ICD (Signal in Space Interface Control Document) auf EU (2021-1) verwiesen.

2.1.1 Der Offene Dienst (OS)

Der Offene Dienst (OS) ist der Standarddienst von Galileo (EU 2021-2) zur Ermöglichung von PNT (Positioning, Navigation & Timing) für alle zivilen Anwendungen. Hierbei können eine bis vier offen zugängliche Frequenzen verwendet werden, z. B. E1, E6, E5a, E5b. Der Offene Dienst ist am ehesten mit dem C/A-Kode GPS, gegebenenfalls unter Berücksichtigung der modernisierten zivilen Signale L2CS (ziviles Signal auf der GPS L2 Frequenz: L2 Civil Signal) und L5 vergleichbar. Der Dienst ist für den Massenmarkt und auch für den professionellen Markt (inkl. Geodäsie) mit einer Mehrfrequenz-Implementierung vorgesehen und wird kostenfrei abgestrahlt. Wie weiter unten noch ausgeführt wird, ergab sich durch den Verzicht auf den SoL-Dienst ein Modifikationsspielraum in der Navigationsdatennachricht, da die sogenannte I/NAV Nachricht (Integrity Message) nicht mehr benötigt wurde. Der Offene Dienst kann leicht mit anderen Satellitennavigationssystemen in einem MS-MF (Multi-System & Multi-Frequenz)-

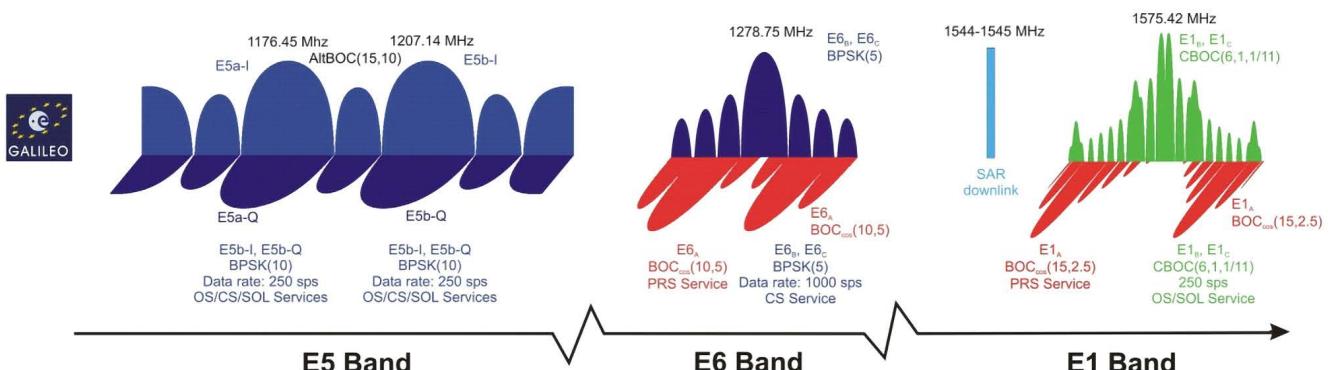


Abb. 2: Galileo-Frequenzen und Signale

Schüler et al. 2009

Szenario integriert werden. Insbesondere ist die Kompatibilität und Interoperabilität mit GPS vorrangig entwickelt worden (US-EU Summit, County Clare, Irland, Juni 2004 in Verbindung mit EU (2011-1)). Die EUSPA (Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm) hat eine Zahl von etwa 2,5 Mrd. Mobiltelefonen genannt, die neben GPS eine Galileo-Funktionalität besitzen. Für den OS soll 2022 die FOC (Full Operational Capability) erklärt werden.

2.1.2 Der Regulierte Öffentliche Dienst (PRS)

Der PRS (Public Regulated Service) ist ein öffentlich regulierter Dienst, der ausschließlich staatlich autorisierten Nutzern für sensible Anwendungen, die eine hohe Kontinuität verlangen, vorbehalten ist. Er wird auf zwei Frequenzen E1A und E6A abgestrahlt (Abb. 2 in Rot) und ist prinzipiell kostenlos. Der PRS ist verschlüsselt und besonders resistent gegen Interferenzen und Störer. Jedes Mitgliedsland der EU entscheidet selbst über die Art der Nutzung des PRS. Die Einrichtung des PRS ist in der neuen EU (2021-3) Weltraumverordnung 2021/696 in Artikel 45, Nr. 1d beschrieben. Der Zugang zum PRS wird in EU (2011-2) durch Beschluss 1104/2011 geregelt. Aufgrund dieser Rechtslage waren die Mitgliedsländer aufgefordert, eine CPA (Competent PRS Authority) einzurichten. In Deutschland wurde die CPA in 2013 eingerichtet. Die CPA ist beim BMDV (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, vormals BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur)) in Berlin angesiedelt. Sie ist zuständig für alle Managementaufgaben des PRS. Da sich die Bundeswehr zunächst bei einer Nutzung von Galileo zurückgehalten hatte, wurde in der BRD die zivile Nutzung für sicherheitskritische Anwendungen favorisiert. Typische Anwendungsbereiche sind: Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben – BOS (polizeilicher und nicht-polizeilicher Bereich), Schutz der zivilen Infrastruktur (Telekommunikation, Energieversorgung), Robustifizierung von Standardanwendungen (z. B. robuste Zeitmarke, Ampelsteuerung) und Verteidigung. Ein Bereich mit großer Herausforderung ist die Entwicklung von hochintegrierten PRS-Empfängern. Da die Nutzung des PRS nur auf die 27 Mitgliedsstaaten begrenzt ist (Drittstaaten benötigen ein Sicherheitsabkommen mit der EU), muss die Empfängerentwicklung durch öffentliche Fördermittel (europäisch, national) in Europa durchgeführt werden und kann nicht dem internationalen Markt überlassen werden. Das BMDV hat hierzu Fördermittel für ein nationales PRS-Programm bereitgestellt. Der PRS soll seine IOC (Initial Operational Capability) in 2023 erreichen.

2.1.3 Der Kommerzielle Dienst (CS)

Der Commercial Service (CS) oder Kommerzielle Dienst hat bei Galileo eine etwas wechselvolle Geschichte erfahren. In der ursprünglichen Konfiguration von G1G (vor 2007) spielte der CS eine wichtige Rolle bei der Re-Finanzierung im Public Private Partnership. Es war angedacht,

dass der geplante Konzessionär professionelle Dienste im CS gegen Gebühr anbietet. Diese Dienste waren seinerzeit noch nicht ausdefiniert. Die Datennachricht des CS war von daher beim Re-Profilin in 2012 zunächst nicht mit Inhalten gefüllt. Das Signal wird aber über die Galileo-Nutzlast physikalisch erzeugt und mit realer Leistung gesendet. Der CS wird auf der Trägerfrequenz E6 = 1278,75 MHz in zwei Phasenkomponenten in Quadratur (I, Q) abgestrahlt: E6B und E6C. Der Zugriff auf die beiden Signale wurde originär über einen Zugriffskode gesteuert. Über E6B können Navigationsdaten übermittelt werden, E6C ist ein sogenannter datenfreier Kanal bzw. Pilotkanal nach EU-Sprachgebrauch. Die Datenrate auf E6B ist für Navigationssignale mit 1000 sps (Symbole pro Sekunde) relativ hoch: Es können netto etwa 500 b/s (Bit pro Sekunde) übertragen werden. Da die G1G-Konstellation die genannten E6-Signale physikalisch abstrahlt und die Navigationsnutzlast nicht modifiziert werden konnte, war man nach 2012 gezwungen, eine tragfähige Lösung für den CS zu finden. In der WG-CS (Working Group – CS) wurde von 2012 bis heute ein neues Konzept für den CS erarbeitet: Dieses beinhaltet zwei Sub-Dienste: Erstens den High Accuracy Service (HAS) auf E6B: Gebührenfreie Precise Point Positioning (PPP)-Korrektur (20 cm, 95 %) und zweitens eine CS-Authentifizierung auf E6C mit kommerziellem Spreizcode (Krypto) gegen Gebühr bzw. gebührenfrei (in Diskussion). Diese werden in Abschnitt 3 diskutiert.

2.1.4 Der Such- und Rettungsdienst (Search and Rescue – SAR)

Eigentlich als Sekundärdienst angedacht, wurde auf vielen G1G-Satelliten ein SAR-Transponder integriert. Diese Funktionalität bei Galileo stellt einen Beitrag zu internationalem und globalen Such- und Rettungsdiensten auf MEO (Mean Earth Orbiting – SAR)-Satelliten dar. Es ergänzt das traditionelle (Internationaler Vertrag von 1979) COSPAR-SARSAT-System (Low Earth Orbiting – SAR). Die Idee besteht darin, Notrufterminals (z. B. Seenot-Bojen) in Quasi-Echtzeit auf der UHF-SAR-Frequenz von 406 MHz zu orten. Im Galileo-Raumsegment wird die Zeitinformation von den Notrufterminals auf 406 MHz empfangen, im SAR-Transponder wird das Signal auf 1544 MHz hochgemischt und zu einer Anzahl von MEO-LUTs (MEO-Local User Terminals) übermittelt. Diese stehen im Bereich der Ozeane in einer bekannten Position (Maspalomas, Spitzbergen, Larnaca, La Reunion). Über eine Zwei-Weg-Laufzeittechnik wird die Position des Notrufterminals bestimmt. Es ist zu beachten, dass dies unabhängig von den G1G-Navigationssignalen geschieht. Die Annahme ist, dass die Seenot-Boje keinen GNSS-Empfänger besitzt. Weiterhin wird ein SAR-Rückkanal (1544–1544, 2 MHz) verwendet, um dem Nutzer in Seenot eine Information über eingeleitete Rettungsmaßnahmen zu geben. Das Galileo-SAR wird beim CNES (Centre National D'Études Spatiales) in Toulouse koordiniert und betrieben. Die Ortsgenauigkeit liegt gemäß EU (2020) bei 2 km (90 %).

2.2 Raumsegment und Konstellationsaufbau

Die wesentliche Änderung an der Konstellation nach 2012 fußte auf einer Verminderung der garantierten Anzahl von Satelliten in eine Walker-Konstellation 24/3/1. Diese ist wie bei GPS (21 + 3) als eine Minimalgarantie zu sehen. In der operationellen Konstellation können deshalb mehr als 24 Galileo-Satelliten arbeiten. Ursprünglich waren für Galileo 30 G1G-Satelliten (27 + 3) vorgesehen. Die übrigen nominellen Bahnparameter sind unverändert gültig: Flughöhe = 23.229,0 km, Exzentrizität = 10^{-4} , Inklination = 56° , Abstand der Bahnebenen im Erdäquator = 120° , Umlaufzeit = 14 h.



Abb. 3: Der Galileo (G1G) FOC-Satellit von OHB

In Abb. 3 sieht man den Galileo FOC-Satelliten. Die Fa. OHB System AG hat mittlerweile den Auftrag für 34 Satelliten Batch#1 (14 Satelliten ab 2014), Batch#2 (acht Satelliten ab 2017) und Batch#3 (12 Satelliten ab 2021) erhalten. Der FOC-Satellit hat eine Masse von 733 kg, der Solargenerator erzeugt 1,9 kW (Spannweite der Solarpannels = 14,7 m), die linearen Abmessungen sind $2,5 \times 1,2 \times 1,1 \text{ m}^3$. Die Navigationsnutzlast hat eine Masse von 130 kg und eine Leistungsaufnahme von 900 W. Die restliche Masse und Leistung entfallen auf die Satellitenstruktur, weitere mechanische und elektrische Sub-Systeme und das OBDH (On-Board Data Handling) der GalileoSat-Plattform. Auf dem FOC-Satelliten werden zwei Atomuhren in zweifacher Redundanz (vier Atomuhren insgesamt) geflogen: Das Rubidium-Standard und der passive Wasserstoff-Maser. Bei Freilauf hat die Rubidium-Referenzuhr eine Genauigkeit von 10 ns/24 h. Der H-Maser ist genauer und hat eine freie Drift von 1 ns/24 h, ist allerdings mit 70 kg deutlich schwerer als das Rubidium mit nur 3,2 kg. Erwähnt werden muss an dieser Stelle, dass neben den FOC-Satelliten noch vier Validierungssatelliten (IOV) zur Konstellation gehören, die von Airbus Defence and Space SE (vormals EADS Astrium GmbH) gebaut worden sind.

Der Konstellationsaufbau wird mit verschiedenen Raketen systemen durchgeführt: Die ersten sieben Einschüsse in den MEO-Orbit wurden ab 2011 mit einer russischen Sojus/Fregat vom Raumfahrtzentrum Guayana (Kourou) in einer Dual-Launch-Konfiguration durchgeführt. Drei

Starts schlossen sich ab 2016 mit Ariane 5 im Vierfach-launch-Modus an. Es gab dann eine Verzögerung bei der Fertigstellung der FOC Batch#3-Satelliten und bei der Ariane 6. Es war zunächst geplant, dass der erste Batch#3-Launch mit Ariane 6 gemacht wird. Da dies nicht möglich war, ist man im Dezember 2021 wieder auf Sojus zurückgegangen (siehe Bemerkung zum Ukraine-Konflikt weiter oben). In 2023 soll dann endgültig auf Ariane 6 gewechselt werden. Bei den verwendeten Raketen handelt es sich um mehrstufige Systeme, die im direkten Einschuss die Satelliten innerhalb von rund vier Stunden in den MEO-Orbit befördern. Die Raketenstufen verwenden klassische chemische Antriebe.

2.3 Boden-Segment

Das Boden- bzw. Kontrollsegment hat in einem Satelliten-navigationssystem eine herausragende, oft unterschätzte Funktion: Die primäre Funktion besteht in der Auswertung von missionsspezifischen Messwerten (alle Strecken- und Phasenmessungen der GSS (Galileo Sensor Stationen) zu den Satelliten). In einer zentralen Einheit ist ein Kernalgorithmus implementiert (Kalman Filter, LSQ (Least Squares Schätzer)), mit dem die Uhrstände und die Ephemeriden der Satelliten geschätzt werden. Weiter wird die Systemzeitskala erzeugt. Die Bahn- und Uhrparameter der Satelliten werden außerdem in die Zukunft prädiziert, formatiert und über Kommunikationsverbindungen in den Rechner der Navigationsnutzlast im Satelliten übertragen, der die Ephemeriden und die Uhrparameter in die Navigationsnachrichten für die Nutzer einsetzt. Dieser Prozess wiederholt sich zyklisch mit einer charakteristischen Zeitkonstante. Bei G1G sind dies 100 min bei GPS 12 bzw. 24 Stunden.

Das G1G-Bodensegment hat zwei Infrastrukturelemente: *Kern-Infrastruktur* und *Service-Infrastruktur*:

Die *Kerninfrastruktur* besteht aus den zwei zentralen GCC (Galileo Control Center). Mit definierter Aufgabenteilung und Back-Up-Funktion steht ein Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen und das zweite in Fucino. Die Kontrollzentren besitzen zwei wesentliche Funktionalitäten: das Galileo Control System (GCS) und das Ground Mission System (GMS). Das GCS führt die klassische Satellitenkontrolle inklusive TT&C (Telemetrie & Telekommando) mit S-Band-Verbindungen zu den Satelliten aus (sechs TT&C-Antennen). Das GMS errechnet, wie oben dargestellt, die Uhrsynchrosynchronisation und die Bahnparameter der Satelliten. Die Verbindungen zu der Konstellation werden hier im C-Band (fünf Mission-Up-Link-Stationen mit mehreren Antennen) hergestellt. Neben vielen Sekundärelementen sind noch die 16 GSS zu nennen, die weltweit verteilt sind. Die GSS sind Referenzempfänger, die in einer bekannten ITRF-Position stehen, primär die Pseudostrecken und Trägerphasen auf allen Galileo-Signalen in Echtzeit messen

und an die Kontrollzentren übermitteln. Zu der Kerninfrastruktur werden noch zwei LEOP (Launch & Early Orbital Phase)-Zentren (Toulouse, Darmstadt), ein In-Orbit-Testzentrum (Redu, Belgien) und der Zeit- und Geodäsie-Provider (Noordwijk, NL) hinzugerechnet.

Die *Service Infrastruktur* setzt sich aus mehreren Einrichtungen zusammen:

- *European GNSS Service Center (GSC)*: Das GSC ist in der Nähe von Madrid gelegen. Es wurde relativ spät in 2013 eingerichtet, da Spanien auch ein wichtiges Infrastrukturelement gewünscht hatte (ursprünglich war ein drittes GCC angedacht). Das GSC hat mittlerweile große Fortschritte gemacht. Es stellt die Schnittstelle zur GNSS-Nutzergemeinschaft dar. Auf der Homepage lassen sich die aktuellen Informationen über das G1G-System und die Konstellation abrufen.
- *Galileo Security Monitoring Center (GSMC)*: Es sind zwei GSMC vorhanden: in St. Germain en Laye (F) und in Madrid (E, seit 2018). Nach dem BREXIT musste das ursprüngliche GSMC in Swanwick (UK) aufgegeben werden. Die Aufgabe der GSMCs besteht im Management und im Monitoring des PRS auf Systemebene (übernational).
- Der BREXIT hat aufgrund der PRS-Problematik auch dazu geführt, dass zwei GSS auf Ascension und den Falklands nicht mehr genutzt werden können. Diese sollen allerdings ersetzt werden.
- *Galileo Reference Center (GRC)*: Das Galileo Reference Center ist in Noordwijk (NL) in unmittelbarer Nähe von ESA/ESTEC (European Space Agency/European Space Research and Technology Center) gelegen. Die Aufgaben liegen in der Qualitätsüberwachung der OS- und CS-Dienste sowie der Datenarchivierung.

2.4 Managementstruktur

Die Managementstruktur von Galileo hat sich über die mehr als 20 Jahre dauernde Entwicklung und die Anpassung an neue Zielsetzungen ständig verändert. In der Frühphase galt Galileo als wissenschaftliches Programm unter der Federführung der ESA. Aufgrund der fortschreitenden Erkenntnisse bei der Dual Use-Problematik (zivil vs. reguliert), der Bedeutung für die zivile Infrastruktur und der frühen Finanzierungssorgen wurde das Vorhaben Schritt für Schritt auf EU-Ebene gehoben mit signifikanten Beiträgen der Mitgliedsstaaten, die unterschiedliche Interessenslagen bei GNSS haben. In diesem Zusammenhang kann nicht auf alle historischen Details des Galileo-Managements eingegangen werden. Der Eigentümer von Galileo ist heute die Europäische Union. Es handelt sich somit um öffentliche Infrastruktur, die in überstaatlichem öffentlichem Eigentum steht. Von daher kommt der Kommission (EC) hier eine federführende Rolle beim Systemmanagement zu. Innerhalb der EC ist die Generaldirektion Verteidigungsindustrie und Weltraum Directorate General

Defence Industry and Space (DG-DEFIS) zuständig, die dem Kommissar Thierry Breton (F) zugeordnet ist. Die aktuelle Grundlage des Galileo-Managements ist das neue FFPA (Financial Framework Partnership Agreement), das im Juni 2021 unterzeichnet wurde. Das FFPA definiert die Rollen und Verantwortlichkeiten der drei Partner: EC, ESA und EUSPA (European Space Programme Agency). Die finanzielle Ausstattung des EU-Weltraumprogramms beträgt für sieben Jahre (mittelfristige Finanzvorschau, 2021–2027) rund 14,8 Mrd. Euro. Es muss beachtet werden, dass es hier um das gesamte EU-Raumfahrtprogramm geht, das über die Aktivitäten Galileo und EGNOS (9,1 Mrd. Euro) hinausreicht (Copernicus, GOVSATCOM, SSA). DG-DEFIS hat die Systemverantwortlichkeit, ESA ist die technische Design-Autorität und EUSPA ist für den Markt, Anwendungen und zukünftig für den operationellen Betrieb verantwortlich. Als weiteres Managementelement wurde im Oktober 2021 ein Galileo Joint Office in Brüssel gegründet. Die Aufgaben bestehen in der Programmkoordination und im Risikomanagement. Jede der drei Institutionen (EC, ESA, EUSPA) entsendet hierfür jeweils drei Mitarbeiter in das Büro.

3 Neuerungen bei der ersten Generation (G1G)

Die noch relativ spät während des FOC-Aufbaus von G1G eingeführten Neuerungen und Anpassungen setzen im Wesentlichen bei der Nutzbarmachung von nicht verwendeten, aber vorhandenen Datenformaten an (Re-Profilierung in 2012). Ähnlich zu GPS wird einigen Signalkomponenten, abgesehen von den Pilotkanälen, eine digitale Datenstruktur von Navigationsdaten aufmoduliert, bevor das Signal durch die Pseudozufallskodes (PRN-Kodes) in die endgültigen Spektren mit einer großen Bandbreite gespreizt wird. Aufgrund des relativ komplexen Dienstkonzeptes von Galileo (siehe Abb. 1) gibt es mehrere Datenstrukturen: F/NAV (F: Free) für den OS, I/NAV (I: Integrity) ebenfalls für den OS, C/NAV (C: Commercial) für den CS und G/NAV (G: Governmental) für den PRS.

Nach dem Galileo Re-Profilierung wurden Teile der I/NAV-Nachricht (früher für Integrität vorgesehen) entbehrlich. C/NAV war undefiniert, da der CS zunächst keine Priorität hatte. Hier entstanden somit gewisse Freiheitsgrade in der Datenstruktur, die für die Implementierung neuer Dienste genutzt werden konnten.

3.1 Der hochgenaue Dienst (HAS)

Der hochgenaue Dienst (beschrieben in GSA 2020) bzw. High Accuracy Service (HAS) ermöglicht ein Precise Point Positioning (PPP), so wie es bei GPS über geostationäre Korrekturdienste gegen Gebühr bereits von vielen kommerziellen, institutionellen und akademischen Betreibern

angeboten wird. Auf die vielen Anbieter von PPP mit geostationären (GEO) Diensten (Trimble, HEXAGON, Veripos, u-blox, John Deere usw.) kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Die wesentliche Innovation des HAS besteht in der Abstrahlung der Korrekturen über MEO-Satelliten für zivile Nutzer. Hierdurch ist es möglich, dass die PPP-Korrekturen auch in den polaren Bereichen der Erde (im Gegensatz zu GEO-Diensten) mit guter Elevation empfangen werden können. Allerdings bewegen sich Galileo-Satelliten relativ zur Erde. Von daher ergeben sich für die Kommunikation der Korrekturdaten von der Erde zum Satelliten über die ULS (Up-Link Stationen) deutlich höhere Anforderungen. Aufgrund einer politischen Entscheidung der Europäischen Kommission und der Mitgliederstaaten im Jahr 2017 wird der Galileo-HAS gebührenfrei zur Verfügung gestellt. Dies ist ein zusätzlicher Vorteil gegenüber den GEO-basierten Diensten.

Die grundlegende Methode des PPP ist bereits seit 25 Jahren bekannt (siehe Zumberge et al. 1997). Bei PPP handelt es sich konzeptionell um eine nicht-differentielle Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten aus der Kombination von Pseudorange- und Trägerphasenmessungen, die meistens auf zwei Frequenzen gemessen werden. PPP hat sich in einem Vierteljahrhundert mittlerweile zu einem großen Forschungsgebiet in Geodäsie und präziser Navigation entwickelt. Der Galileo-HAS wird hierzu einen wichtigen Beitrag liefern.

Signaltechnisch wird der hochgenaue Dienst HAS auf der E6B = 1278,75 MHz-Frequenz implementiert. Hierbei wird die Datenrate von 448 Bits/s (1000 Symbole/s) pro Satellit für PPP-Korrekturdaten von Galileo & GPS verwendet (Details siehe GSA 2020). Essenziell für den HAS ist die Ableitung der Satelliten- und Laufzeitkorrekturen. Man benötigt hierzu einen Satz von globalen Referenzstationen (im ersten Schritt die Galileo GSS). Die Messwerte der Referenzstationen werden über Land- und Satellitenleitungen an das Galileo Service Center (GSC) in Madrid übermittelt. Im GSC läuft der High Accuracy Data Generator (HADG)-Algorithmus, um sämtliche erforderliche PPP-Korrekturen zu berechnen. Diese werden zur HAS-Nachricht formatiert und über die ULS an die Galileo-Konstellation übertragen. Dort wird die HAS-Nachricht in den C/NAV-Datenrahmen eingesetzt und an das Nutzersegment auf E6B übertragen.

Bei den angedachten HAS-Korrekturen handelt es sich um folgende Größen: Satellitenbahn- und Uhrkorrekturen, Kode- und Trägerphasen-Delays in der Nutzlast, ionosphärische Korrekturen im Minimum für das Gebiet der EU.

Die Genauigkeit für G1G ist mit 0,2 m (95 %) horizontal und 0,4 m (95 %) vertikal, erreichbar in einer Konvergenzzeit von 100 bis 300 s, in GSA (2020) angegeben. Die Konvergenzzeit von 300 s bezieht sich auf einen Service Level 1 (SL1), die 100 s beziehen sich auf einen verbesserten Service Level 2 (SL2). SL1 verwendet die globalen GSS als Referenzstationen. Beim SL2 sollen noch weitere europäische Referenzstationen einbezogen werden, um

die Ionosphäre und die Troposphäre besser kompensieren zu können. Die IOC für den HAS soll 2022 und die FOC 2024+ erklärt werden. Derzeit ist das HAS-Signal in Space Interface Dokument (SIS ICD) in Arbeit. Die Herausforderung liegt weniger in der Theorie der Methode als in der genauen Berechnung der vielfältigen Korrekturen und der verzögerungsfreien Kommunikation zum Nutzer.

3.2 Die Authentifizierung gegen Täuschen (Spoofing)

GNSS-Systeme sind verwundbar durch Stören (Jamming) und Täuschen (Spoofing). Beim Stören wird ein Schmalband- oder Breitbandsignal in Richtung Empfänger gesendet, um bestimmte Funktionen zu degradieren. Höhere Störfestigkeit kann durch höhere Leistung und Bandbreite der GNSS-Signale, aber auch durch vielfältige Maßnahmen der Empfängertechnik (Härtung) erreicht werden. Beim Täuschen gibt es zwei wesentliche Szenarien, um den Empfänger zu manipulieren: *Generativer Ansatz*, d.h. ein Pseudosignal wird am Boden generiert (Pseudolite) und abgestrahlt. *Nicht-Generativer Ansatz (Meaconing)*: Signal wird mit Transponder empfangen, verzögert und wieder abgestrahlt, oder Signal wird aufgezeichnet und wieder abgestrahlt (Record & Replay). Die Methoden des Meaconing sind gefährlicher als der generative Ansatz, da beim Meaconing die technische Schwelle vergleichsweise niedrig ist.

3.2.1 OS-NMA (Open Service Navigation Message Authentication)

Das OS-NMA ist eine Methode mit mittlerer Komplexität, die nachträglich (von 2012 bis 2020) in das G1G implementiert wurde. Sie stellt eine Teillösung dar, um den Galileo OS robuster gegen Spoofing zu machen. Hierbei werden frei gewordene Datenbits der I/NAV-Nachricht auf E1B und E5B für das NMA-Konzept verwendet. Die NMA-Methode setzt an der Navigationsnachricht an (nicht am PRN-Kode), indem eine zusätzliche digitale Signatur in die Binärfolge der I/NAV von Zeit zu Zeit eingesetzt wird (EU 2021-4).

Das grundlegende Konzept (Abb. 4) besteht darin, dem Endgerät des Nutzers eine valide Information zu geben, dass das Signal von einem Galileo-Satelliten stammt und nicht von einem Spoofing. Beim OS-NMA wird diese Information in die Navigationsnachricht eingesetzt. Wie man aus Abb. 4 erkennt, wird ein asymmetrisches Verschlüsselungsverfahren mit einem öffentlichen Schlüssel k_{pub} und einem privaten Schlüssel k_{priv} verwendet. Das Verfahren funktioniert grob skizziert wie folgt: Der öffentliche Schlüssel ist allen Teilnehmern bekannt. Im Bodensegment (GSC) wird der private Schlüssel k_{priv} (geheim) erzeugt. Zusammen mit Datenbits in I/NAV wird danach mit einer Kryptofunktion die digitale Signatur A berechnet und in die Navigationsnachricht an vorgesehener Stelle eingesetzt.

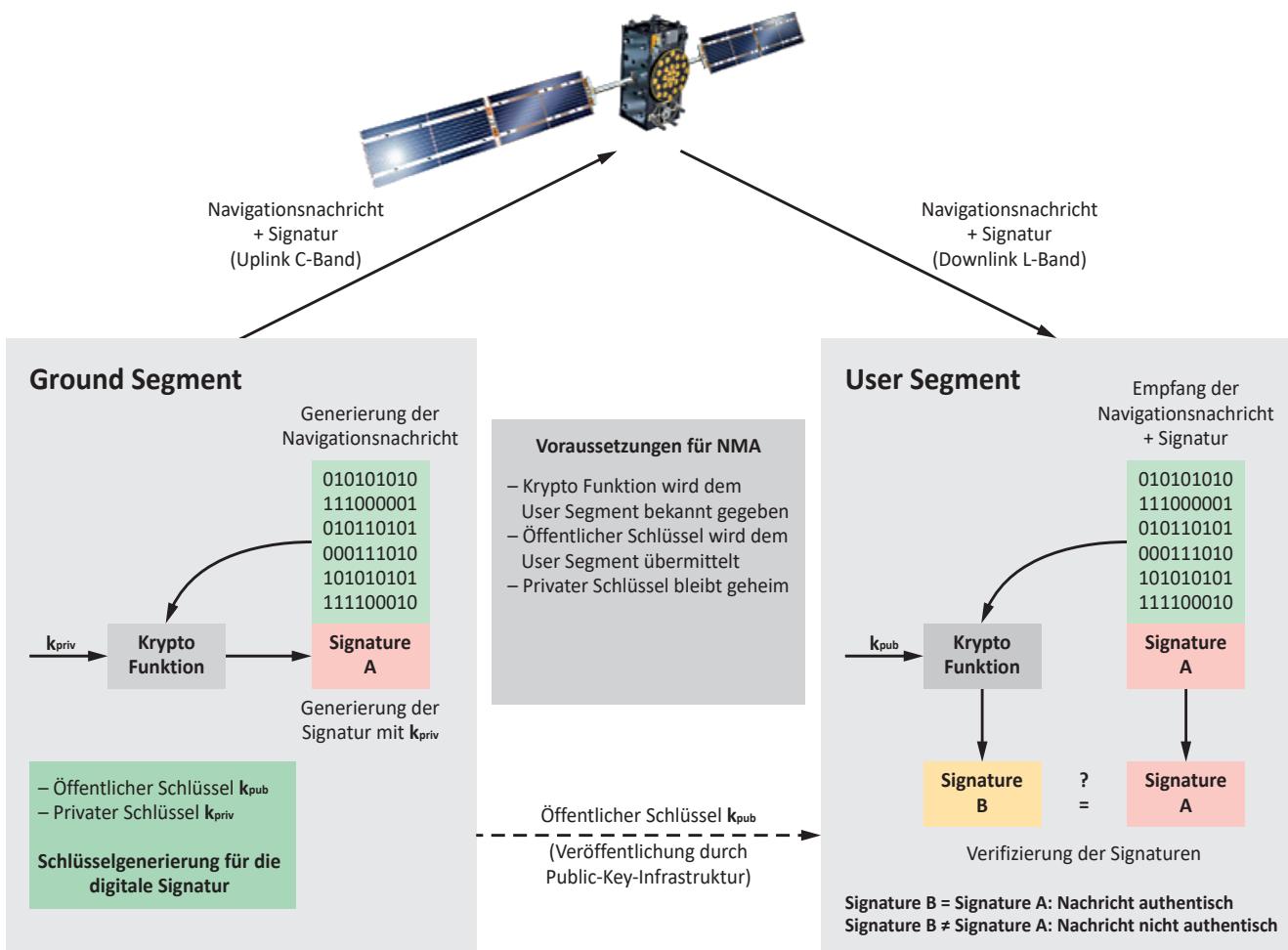


Abb. 4: Konzept des OS-NMA (Navigation Message Authentication)

Die so signierte Navigationsnachricht wird vom Boden über den Satelliten zum Nutzer übertragen. Der Nutzer liest die empfangenen I/NAV-Datenbits und erzeugt mit k_{pub} über die Kryptofunktion eine digitale Signatur B im Empfänger. Am Ende des Prozesses wird die Signatur A mit der Signatur B verglichen. Sind die digitalen Signaturen gleich, ist das Signal authentisch, d. h. es stammt vom Satelliten. Das Verfahren basiert auf dem TESLA (Time Efficient Stream Loss Tolerant Authentication)-Protokoll. Die Zeit zur ersten Authentifizierung beträgt nach EU (2021-4) von 1 bis zu 5 min. Eine Authentifizierung kann nur alle 30 s errechnet werden. Die Schutzfunktion gegen Täuschen wird als eher leicht eingeschätzt (Bemerkung in EU 2021-4, S. 4 und Einschätzung des Autors). Im Jahr 2020 wurde ein Live-Test durchgeführt, 2021 begann eine öffentliche Testphase und 2023+ soll der Dienst bereitgestellt werden.

3.2.2 CAS (Commercial Authentication Service)

In G1G wird ein weiteres Element zur Authentifizierung entwickelt und implementiert. Hierbei handelt es sich um den Commercial Authentication Service, der in der Signalkomponente E6C (Pilotsignal) integriert wird (Fernandez-Hernandez et al. 2018). Die Einrichtung eines CAS geht auf die Implementierungsentscheidung EU 2017/224 zurück. Beim CAS wird anders als bei OS-NMA der Spreizkode verschlüsselt, d. h. es wird eine Verschlüsselung der Streckenmessung durchgeführt. Mit PRN (Pseudo Random Noise) sei der Pseudozufallskode bezeichnet und mit SCA (Spreading Code Authentication) der Schlüssel. Die grundlegende Methode besteht darin, eine schnelle binäre PRN-Kode-Sequenz mit einer langsameren binären Kryptosequenz zu verschlüsseln. Dies kann im einfachsten Fall bei einer linearen Methode über binäres Addieren (modulo-2) von $PRN \oplus SCA$ erreicht werden, siehe Tab. 1.

Man erkennt an diesem Schema, dass die PRN-Bits sich verändern, wenn das SCA-Bit den Wert 1 hat. Hat das SCA-Bit den Wert 0, so bleibt das PRN-Bit unverändert. Im Empfänger wird die Verschlüsselung rückgängig gemacht: $PRN = (PRN \oplus SCA) \oplus SCA$. Das Schema soll nur das Konzept

Tab. 1: Grundprinzip der Verschlüsselung mit SCA (Spreading Code Authentication)

PRN-Code:	10011101		00110100		10001100		...
SCA-Code:	11111111		00000000		11111111		...
PRN \oplus SCA:	01100010		00110100		01110011		...

beschreiben und nicht die finale CAS-Implementierung. Derzeit läuft der sogenannte Konzept Review für den CAS. Es werden im Übrigen zwei Varianten diskutiert und miteinander verglichen: Ein A-CAS (Assisted-CAS) und der S-CAS (Standalone-CAS). Beim A-CAS wird eine zusätzliche Serververbindung zum Empfänger für den Zugriff auf den Schlüssel benötigt, beim S-CAS muss der Schlüssel im Empfänger vorhanden sein (Voreinstellung, Raumsignal). Eine weitere Diskussion dreht sich um die Frage, ob der CAS kostenfrei oder gegen Gebühr bereitgestellt werden soll. Ein A-CAS kann mit IOC in 2024/25 in Betrieb genommen werden. Die Schutzfunktion des CAS gegen Spoofing wird höher eingeschätzt als die des OS-NMA, aber deutlich schwächer als die des PRS.

4 Galileo der zweiten Generation (G2G)

Nachdem das System G1G bis ca. 2008 grundlegend definiert war und anschließend entwickelt und gebaut werden musste, lief in den USA bereits das Modernisierungsprogramm GPS III. Es ergab sich deswegen die Fragestellung, wie man Galileo mit den internationalen GNSS-Entwicklungen konkurrenzfähig halten könnte. Es gab mittlerweile eine Vielzahl neuer Anforderungen: Cybersicherheit von PNT-Lösungen, höhere Stör- und Täuschfestigkeit, ultra-schnelle Signalakquisition für Mobilität und IoT (Internet of Things)-Anwendungen, hohe Genauigkeit und Integrität für autonome Fahrzeuge, Optimierung des operationellen Konzeptes und Verwendung von »EU Only«-Technologien. Da die G1G-Plattform (735 kg, 1,9 kW) kaum noch Spielraum für neue Nutzlastelemente hatte (sie ist vergleichbar mit GPS II/IIA), musste ein neuer Galileo-Satellit für G2G entwickelt und das Gesamtsystem überdacht und verbessert werden. Der neue G2G-Satellit von Airbus hat eine Masse von 2400 kg. Die Primärleistung ist nicht bekannt. Leider sind bei G2G viele Systemeigenschaften klassifiziert, so dass eine detaillierte Erläuterung im Moment nicht möglich ist. Es kann nur der Kontext der Public Domain wiedergegeben werden (Chatre et al. 2021). Die Charakteristika von G2G lassen sich in zwei Bereiche aufteilen: Technische Neuerungen und neue bzw. verbesserte Dienste.

4.1 Technische Neuerungen

Es ist eine Vielzahl von technischen Neuerungen vorgesehen bzw. wird diskutiert (mit Erhöhung der Lebensdauer von 12 auf 15 Jahre):

- *Ein neues Signal für den Offenen Dienst (möglicherweise benannt mit E1D)*

Die Definition der Galileo-G1G-Signale geht zurück auf die Zeit von 2000 bis 2007. Damals gab es noch keine Anforderungen für eine hochsensitive Akquisition unter niedrigen C/N₀-Bedingungen. Die Signale wurden pri-

mär mit dem Ziel »Genauigkeit« (niedriges Rauschen und geringe Mehrwegeausbreitung) ausgelegt. Heute sind die ultra-schnelle Akquisition im Mobilgerät und die stromsparende Signalverarbeitung auf dem GNSS-Chip (IoT) hinzugekommen. Von daher wird überlegt, wieder ein einfaches, leicht zu akquirierendes Signal zusätzlich zu implementieren.

- *Anpassung Signalpegel*

Die Signalpegel (empfangene Signalleistung an der Erdoberfläche) der G2G-Satelliten sind klassifiziert. Höhere Signalpegel wären wünschenswert, da diese einen Beitrag zur Erhöhung der Störsicherheit leisten würden. Die Problematik der Pegelerhöhung ist jedoch sehr komplex: Es muss auf der einen Seite die Frequenzkompatibilität nach ITU (International Telecommunications Union)-Regeln (Einhaltung von Interferenzkriterien, z. B. zwischen Galileo und Beidou) gewahrt werden. Auf der anderen Seite müssen die Anforderungen der sogenannten nationalen Sicherheit aufgrund bilateraler Abkommen (z. B. EU – USA) erfüllt werden. Vorhandene Spielräume nach oben wird man ausnutzen.

- *Flexiblere Nutzlast*

Die Wertschöpfungskette in einem Satellitennavigationssystem dauert teilweise 10+ Jahre. Man beginnt mit Nutzeranforderungen und bis das Signal dann abgestrahlt wird, ist mehr als ein Jahrzehnt ins Land gegangen. Es ist leicht verständlich, dass sich die Anforderungen der Nutzer über solche Zeiträume durchaus verändert haben können. Die geeignete Gegenmaßnahme ist eine flexible, d. h. im Orbit programmierbare Navigationsnutzlast. Mit dieser können neue Signale und Datenstrukturen jederzeit angepasst werden.

- *Verbesserte und kleinere Atomuhren: Rubidium & Maser Ensemble, alternative Frequenznormale*

Bei den Atomuhren von G1G gibt es gleich mehrere Verbesserungsmöglichkeiten: Kompaktere Bauweise mit geringerer Masse, robustere Funktion durch genaues Verständnis der physikalischen Effekte und Limitierungen, mehr Atomuhren, z. B. sechs anstelle von vier, Implementierung einer Ensemble Uhr an Bord des Satelliten in heißer Redundanz (alle Uhren laufen permanent). Alternative Atomuhren sind zukünftig ebenfalls angedacht. Hierbei bieten sich verschiedene Technologien an, die in Europa mit unterschiedlichem Entwicklungsstand prinzipiell vorhanden sind. Zu nennen wären optisch gepumpte Rubidium- oder Cäsium-Uhren, Quecksilber-Ionen-Uhren und optische Atomuhren (z. B. Iodine Optical Clock). Die technische Reife ist bei allen Uhren erheblich zu steigern, um die Weltraumtauglichkeit und Lebensdauer über viele Jahre im Orbit zu erreichen.

- *Effizientere Endverstärker (High Power Amplifier – HPA)*

Die G1G-FOC-Satelliten sind mit Endverstärkern (HPA) auf Röhrenbasis (Travelling Wave Tube Amplifier – TWTA) ausgerüstet, da diese seinerzeit höhere Effizienz (geringere Verlustleistung) besaßen. Mittlerweile sind effiziente Hableiterverstärker (Solid State Power

Amplifier – SSPA) auf der Basis GaN (Gallium Nitrit) verfügbar. Travelling Wave Tube Amplifier und Solid State Power Amplifier haben Vor- und Nachteile, die abzuwegen sind.

■ *Inter-Satellite-Links (ISL)*

ISL haben in Satellitennavigationssystemen zwei Vorteile: Sie können eingesetzt werden, um Strecken zwischen den Satelliten unabhängig oder in Ergänzung des Bodensegments zu messen. Zum anderen können diese verwendet werden, um Missionsdaten im Raumsegment direkt auszutauschen. Es gibt prinzipiell zwei ISL-Technologien: Man kann Radio-Frequenz-Signale einsetzen oder auch optische Technologien (Laser) verwenden. Prinzipiell unterstützen ISL die Bahn- und Zeitbestimmung und das Monitoring von Ausreißern (Integrity) im Raumsegment.

■ *Elektrische Antriebe (Electronic Propulsion System – EPS)*

Mit 2400 kg ist die Masse des G2G-Satelliten dreimal größer als bei G1G. Um die Launch-Kosten, die etwa 30 % bei einer SatNav-Konstellation ausmachen, begrenzt zu halten, muss am Mehrfach-Launch-Prinzip festgehalten werden. Dies ist aber bei Ariane 6 mit Verwendung eines zusätzlichen MEO-Boosters schwer einzuhalten. Hier kommt nun der elektrische Antrieb (Electronic Propulsion System – EPS) ins Spiel. Das EPS arbeitet permanent mit einem kleinen Schub im Milli-Newton-Bereich, wodurch sich der Satellit spiralförmig nach oben in Richtung Ziel-Orbit bewegt. Dies dauert dann allerdings mehrere Wochen. Beim klassischen chemischen Antrieb arbeitet man mit Schub im Kilo-Newton-Bereich und erreicht den Ziel-Orbit in rund vier Stunden.

4.2 Neue Dienste

Nach Chatre et al. (2021) werden mehrere neue bzw. verbesserte Dienste bei G2G eingerichtet. Eine Rückwärtskompatibilität mit G1G muss hierbei allerdings garantiert werden:

■ *SAS (Signal Authentication Service)*

Die Authentifizierung von Signalkomponenten aus G1G wird weitergeführt und ergänzt. Neben der NMA-Technik werden sicherlich RA (Ranging Authentifizierung)-Elemente integriert. Nach der EU (2021-3)-Weltraum-VO soll der Begriff »kommerziell« bei CAS nicht mehr weiterverwendet werden, um eine gebührenfreie Bereitstellung zu ermöglichen, wenn dies gewünscht ist.

■ *Verbesserter Zeitdienst, HAS, PRS und SAR Dienste*

Mit den deutlich erweiterten Ressourcen der G2G-Satelliten und den »Lessons Learned« aus G1G werden sämtliche G1G-Dienste mit Rückwärtskompatibilität durchgreifend verbessert werden.

■ *SSV (Space Service Volume)*

Dies ist ein neuer Dienst, der die Nutzung von GNSS für Weltraumanwendungen bei der Bahnbestimmung von Satelliten als Nutzer ermöglichen soll. Prinzipiell wer-

den der Bereich LEO (< 3000 km), MEO/GEO (3000–36000 km) unterstützt. Darüber hinaus wird noch die Bahnhöhe bis zum Mond für künftige Mondmissionen diskutiert. Bei SSV handelt es sich um eine internationale Aktivität der UN, Office of Outer Space Affairs, an der alle Raumfahrtnationen teilnehmen.

■ *Unterstützung A-RAIM*

Bei RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) geht es um eine bordautonome Methode, um Ausreißer in den Messwerten zu detektieren und zu isolieren. RAIM ist ein Algorithmus, der für die Zulassung von Luftfahrt-GNSS-Empfängern notwendig ist, um die Integrität in bestimmten Flugphasen bis hin zur Landung zu gewährleisten. Beim A-RAIM (A = Advanced) bekommt der GNSS-Empfänger von G2G eine zusätzliche ISM (Integrity Support Message), z. B. über die aktuelle Genauigkeit des Systems. Durch A-RAIM wird der in 2012 stillgelegte SoL-Dienst kompensiert. Die A-RAIM-Methode wird in einer gemeinsamen EU-US-Arbeitsgruppe im Detail definiert.

■ *EWS Emergency Warning Service (EWS)*

Mit diesem neuen Dienst soll es möglich sein, Warnungen bei Katastrophen global an GNSS-Empfänger zu verteilen. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn die terrestrische Kommunikationsinfrastruktur zerstört wird, so wie es bei der Flutkatastrophe 2021 im Ahrtal der Fall war. Für die BRD ist hier das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe maßgeblich beteiligt.

4.3 Aufträge und Konstellationsaufbau

Die G2G-Entwicklung läuft offiziell seit 2015. Diese begann zunächst mit dem EGE (European GNSS Evolution Programm) der ESA im Jahr 2007 und einer Weiterführung in dem EU-Programm Horizon 2020. 2021 wurden zwei Aufträge für (6 + 6) G2G-Satelliten an Airbus Defense & Space (D) und an Thales (I) vergeben. Das G2G-Bodensegment wird in 2022 ausgeschrieben. Der erste G2G-Satellit soll 2024 ausgeliefert werden. Die Konstellation soll für eine IOC in 2027+ bereitstehen, für die FOC dann in 2030+.

5 Schlussbetrachtung und Ausblick

Trotz der unerwartet steilen Lernkurve über zwei Dekaden, einiger Krisen und Rückschläge ist Galileo heute in einem guten Entwicklungszustand. Die Weiterentwicklung und Finanzierung ist aus heutiger Sicht gesichert, da die EU 9,1 Mrd. Euro im Rahmen der MFF (Mittelfristige Finanzvorschau) für den Zeitraum 2021 bis 2027 für Galileo und EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) in den Haushalt eingestellt hat. Hinzu kommt, dass mittlerweile eine hohe technische Expertise in Europa

im Bereich der F&E vorhanden ist. Aufgrund der politischen Einordnung ist Galileo nach wie vor ein ziviles System unter ziviler Kontrolle. Und diese Tatsache impliziert anders als bei einem Dual Use System (militärisch/zivil), bei dem es einen dominanten Auftraggeber gibt (wie z. B. das Department of Defense in den USA für GPS), einen sehr komplexen Entscheidungsprozess auf europäischer Ebene und in den Mitgliedsstaaten. Aufgrund der vertraglichen Rechtsgrundlagen der EU müssen die Mitgliedsstaaten auch bei Galileo in allen politischen und technischen Entscheidungen beteiligt werden.

Erklärung

Das Papier gibt die persönliche Sicht und Einschätzungen des Autors wieder. Es ist keine Darstellung des Galileo-Projektes von institutioneller oder staatlicher Seite. Es wurde versucht, die Fakten, die sich in der Public Domain befinden, so genau wie möglich wiederzugeben. Selbstverständlich ergeben sich hier im Detail gewisse Grenzen.

Das Institut für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung – Navigation (ehem.: Erdmessung und Navigation) unter der Leitung der Professoren Hein, Eissfeller, Pany begleitet das Galileo-Projekt in einer unterstützenden Rolle für die Bundesregierung und das DLR-Raumfahrtmanagement seit Ende der 90er Jahre. Wir nehmen in einigen Arbeitsgruppen der EC in Brüssel zu Galileo im Auftrag des BMDV (Bundesministerium für Digitales und Verkehr) und der DLR-Raumfahrtagentur als technische Experten teil. Des Weiteren sind wir im NAVigation Innovation and Support Programme Advisory Committee (NAVAC) für das Navigation Innovation and Support Programme (NAVISP) der ESA und im Programmausschuss des DLR für »Kommunikation und Navigation« vertreten.

Wir bedanken uns bei den genannten Institutionen für das langjährige entgegengebrachte Vertrauen.

Literatur

- Avila-Rodriguez, J. A., Hein, G. W., Wallner, S., Issler, J.-L.; Ries, L., Lestarquit, L., de Latour, A., Gode, J., Bastide, F., Pratt, T., Owen, J. (2007): The MBOC Modulation – A Final Touch for the Galileo Frequency and Signal Plan. *InsideGNSS*, 43–58, Gibbons Media and Research. www.insidegnss.com, September/October 2007.
- Chatre, E., Verhoef, P., Benedicto, J. (2021): Galileo Status Up-Date, *Proceedings of ION GNSS+*. St. Louis, MO, 1305–1337.
- EU (2011-1): Agreement on the promotion, provision and use of Galileo and GPS satellite-based navigation systems and related applications. *Official Journal of the EU*, L 384/3.
- EU (2011-2): Decision 1104/2011/EU of the European Parliament and Council on the rules for access to the public regulated service provided by the global navigation satellite system established under the Galileo programme. *Official Journal of the EU*, L 281/1, Oct. 2011.
- EU (2017): Commission Implementing Decision (EU) 2017/224. *Official Journal of the EU*, Feb. 2017, Brüssel.
- EU (2020): SAR/Galileo Service Definition Document. V 2.0, Jan. 2020.
- EU (2021-1): European GNSS (Galileo) Open Service Signal-in-Space Interface Control Document. Issue 2.0, Jan. 2021.
- EU (2021-2): European GNSS (Galileo) Open Service Definition Document. Issue 1.2, Nov. 2021.
- EU (2021-3): Verordnung 2021/696 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. April 2021 zur Einrichtung des Weltraumprogramms der Union und der Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm.
- EU (2021-4): Galileo Open Service Navigation Message Authentication (OSNMA). EUSPA, Prag.
- Fernandez-Hernandez, I., Vecchione, G., Diaz-Pulido, F. (2018): Galileo Authentication: A Programme and Policy Perspective. 69th International Astronautical Congress, Bremen, IAC-18.B2.4.1.
- GSA (2020): Galileo High Accuracy Service (HAS) Info Note. European Global Navigation Satellite Systems Agency, Prag.
- Schüler, T., Wallner, S., Eissfeller, B. (2009): Entwicklungsstand GALILEO mit einem Ausblick auf die Kombination mit GPS für die schnelle RTK-Positionierung. *zfv*, 6/2009, 134. Jg., 363 ff.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., Webb, F. H. (1997): Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysics, Res.* 102, 5005–5017.

Kontakt

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Bernd Eissfeller
Exzellernter Emeritus
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
bernd.eissfeller@unibw.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaeisie.info.