



Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO – Entwicklungsstand

Bernd Eissfeller, Markus Irsigler, Jose-Angel Avila-Rodriguez, Eva Schüler, Torben Schüler

Das Großprojekt GALILEO der Europäischen Union tritt zur Zeit in seine entscheidende Phase. Seit 2003 läuft der Auswahlprozess der Konzessionäre. Der Abschluss des endgültigen Vertrages für die Konzession ist für das Jahr 2007 vorgesehen. Der Beitrag zeigt das organisatorische und technische Konzept des europäischen Gemeinschaftsprojektes GALILEO auf.

1 Einleitung

Basierend auf der Kommunikation [1] der Europäischen Kommission vom 9. Februar 1999 („GALILEO Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services“) wird in Europa gegenwärtig das Satellitennavigationssystem GALILEO entwickelt. Einerseits soll damit die Unabhängigkeit von GPS bzw. eine effektive Ergänzung erreicht werden. Andererseits soll hiermit auch die Fähigkeit Europas erheblich verbessert werden, sich auf dem Welt-Markt für Satellitennavigation und den damit zusammenhängenden Anwendungen und Diensten einen gewichtigen Marktanteil zu sichern. Die strategische und wirtschaftliche Bedeutung von GALILEO für Europa ist unumstritten. Dies wurde auf mehreren Tagungen des Europäischen Rates, z.B. Laeken am 14. und 15. Dezember 2001 (Tagesordnungspunkt 33) immer wieder bestätigt [2]. Obwohl der politische Wille zum Aufbau von GALILEO vorhanden ist, gingen die Meinungen der Mitgliedsländer über die Finanzierung des Programms teilweise auseinander, insbesondere was die Beiträge des privaten Sektors zu den Entwicklungskosten betrifft (Public-Private-Partnership). Dieser Konflikt verwundert hier etwas, da GALILEO für europäische Maßstäbe mit Errichtungskosten von 3,2 Mrd. € (das sind die Kosten für 150 km Autobahnneubau), die zudem noch über 8–10 Jahre aufzubringen sind, nicht teuer ist, aber ohne Frage ein Beitrag zur Lösung der wirtschaftlichen Strukturprobleme in Europa darstellt. Derzeitige Schätzungen gehen davon aus, dass GALILEO zur Schaffung bzw. Sicherung von 100 000 Arbeitsplätzen führt, und dass der mit GALILEO verbundene Dienstleistungs- und Endgerätemarkt mit rd. 9 Mrd. € pro Jahr angenommen werden kann. Unabhängige Abschätzungen der wirtschaftlichen Rentabilität von GALILEO zeigen ein Nutzen-/Kostenverhältnis von etwa 4,6 an, was bei Infrastrukturprojekten als sehr guter Wert gilt.

1.1 Status

GALILEO ist ein Großprojekt, das in Zusammenarbeit von Organen der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) durchgeführt wird. Seit Juni 2003 hat das gemeinsame Unternehmen (GALILEO Joint Undertaking oder GJU) mit Sitz in Brüssel die Verantwortung für die GALILEO Realisierung übernommen. GALILEO soll prinzipiell in drei Phasen (Definition, Entwicklung, Errichtung) realisiert werden. Nach einer Definitionsphase, die im Jahr 1999 mit einer grundlegenden Systemstudie [3] („Comparative System Study“) begonnen wurde, läuft seit Dezember 2003 die Vorentwicklungsphase C0. Eine positive Entscheidung des Rates der Verkehrsminister wurde nach mehreren Verschiebungen für April 2001 erwartet, aber auch bei diesem Treffen der Verkehrsminister im April 2001 wurde keine weitergehende Entscheidung getroffen. Da der kritische Punkt des GALILEO Projektes weniger die Technik darstellt, sondern vielmehr die Finanzierung, zumal aus dem Bereich des privaten Sektors ursprünglich nicht mehr als 200 Mio. € zugesagt waren, wurde ein von Price Waterhouse Coopers (PWC) geführtes Konsortium [4] von der EU beauftragt, unabhängig das Projekt GALILEO im Rahmen einer Kosten/Nutzenanalyse erneut zu bewerten und einen Geschäftsplan zu entwickeln. Die grundlegende Aussage der Studie bestand darin, dass die öffentliche Hand deutlich länger Mittel bereitstellen muss – bis in die Anfangsphase des Betriebes hinein – erst danach kann ein höherer Beitrag des Privatsektors greifen. Nach vielen nationalen Diskussionen [5] gab dann der Europäische Verkehrsministerrat am 26.03.2002 grünes Licht für den Aufbau von GALILEO. Ein weiterer strittiger Punkt war, ob Deutschland oder Italien die industrielle Führung übernehmen sollte. Beim Verkehrsministerrat am 28.03.2003 wurde festgelegt, dass Deutschland die Systemführung erhält und der Sitz von GALILEO Industries nach München verlegt werden soll. In dem Treffen wurden auch die finanziellen Anteile wie folgt festgelegt: Deutschland 20,9 %, Italien 15,2 %, Frankreich 17,0 %, Großbritannien 16,0 %, Spanien 10,1 % und Belgien 5,8 %.

Seit Oktober 2003 läuft der Auswahlprozess für den Konzessionär. Die Konzessionsvergabe betrifft die Errichtungsphase des Systems, welche für den Zeitraum 2006/2007 geplant war und zu der neben dem Aufbau der Bodenstationen auch der Start der insgesamt 30 Satelliten gehört sowie die daran anschließende Betriebsphase.

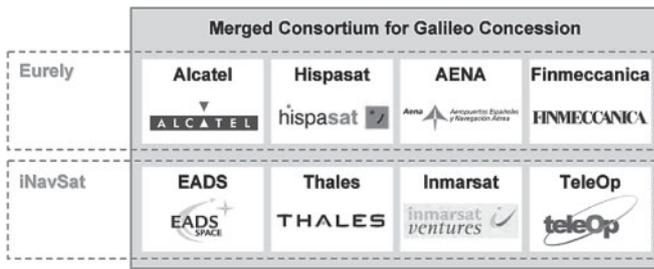


Abb. 1: Übersicht über die Partner des fusionierten Konsortiums

Durch den Konzessionsvertrag wird der Konzessionsnehmer zur Durchführung der beiden Phasen verpflichtet. Im Februar 2004 kamen drei Konsortien in die zweite Runde der Vergabe um die GALILEO Konzession, dies waren neben dem iNavSat-Konsortium (EADS, Inmarsat und Thales) ein weiteres Konsortium, bestehend aus u.a. Alcatel, Finmeccanica und Vinci Concessions, sowie das Eutelsat Konsortium (Eutelsat, Hispasat, LogicaCMG und AENA).

Nach dem Rückzug des Eutelsat-Konsortiums befanden sich im März 2005 noch zwei Konsortien in der Auswahl: Eurely (bestehend aus Alcatel, Finmeccanica, AENA und Hispasat) sowie das iNavSat-Konsortium, deren Angebote sich nur minimal unterschieden. Im Mai kündigten die beiden Konsortien eine mögliche Fusion an und legten dem GJU am 20. Juni einen gemeinsamen Vorschlag vor. Am 27. Juni lautete die Antwort aus Brüssel, dass beide gemeinsam als Konzessionäre für den Bau und Betrieb von GALILEO verantwortlich sein sollen.

Im Oktober 2005 wurde ein Angebot des fusionierten Konsortiums abgegeben und im Dezember 2005 wurde in Brüssel ein Abkommen zwischen den Partnern über die GALILEO Konzession unterzeichnet, welcher folgende Punkte enthält [6]:

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

Der Abschluss des endgültigen Vertrages ist für das Jahr 2007 vorgesehen.

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

Nach dem Stand der derzeitigen Planungen, sollen die Entwicklungs- und Validierungsphase (In Orbit Validation) 48 Monate dauern, die Errichtungsphase 24 Monate,

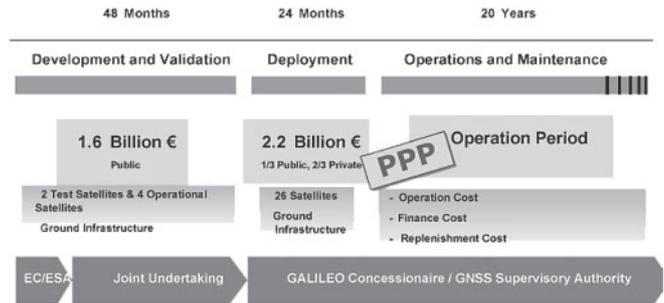


Abb. 2: Zeitplan und Verantwortlichkeiten [8]

daran schließt sich eine Betriebsphase von 20 Jahren an. Abbildung 2 zeigt den vorgesehenen zeitlichen Rahmen sowie die jeweiligen Verantwortlichkeiten. Die aktuelle zeitliche Planung sieht eine Dauer der Entwicklungs- und Validierungsphase bis Anfang 2009 vor. Die daran anschließende Errichtungsphase ist für den Zeitraum von 2009–2010 geplant. Der Anfang der Betriebsphase, die auf eine Dauer von 20 Jahren angelegt ist, soll 2010 beginnen [7].

Im Rahmen der Entwicklungsphase sollten zwei Experimentalsatelliten gestartet werden. Im November 2005 wurde der erste GALILEO Satellit, der vom Unternehmen Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) gebaut worden war, auf den Namen GIOVE-A (GALILEO In Orbit Validation Element) getauft. Er wurde am 28. Dezember an Bord einer Sojus-Trägerrakete vom Raumfahrtzentrum Baikonur ins Weltall transportiert. Am 10. Januar 2006 nahm das SSTL Missionskontrollzentrum die Nutzlasterprobung in Angriff und am 12. Januar 2006 wurde der Empfang der ersten Signale gemeldet. GIOVE-A besitzt eine Masse von 600 kg und eine Abmessung von $1,3 \times 1,3 \times 1,4 \text{ m}^3$ [9]. Diesem Satelliten sollte Anfang 2006 ein zweiter von GALILEO Industries gebauter Satellit folgen. Der zweite, GIOVE-B genannte Satellit wird eine Masse von 523 kg, eine Primärleistung von 943 kW und eine Abmessung von $0,955 \times 0,955 \times 2,4 \text{ m}^3$ besitzen. Der Start dieses Satelliten wird sich jedoch verzögern und ist derzeit für Anfang 2007 geplant.

Die Hauptaufgaben von GIOVE-A und -B waren zum einen die Sicherung der von der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) zugewiesenen Frequenzen, zum anderen sollten sie die für die Konstellation der GALILEO-Satelliten erforderlichen Messwerte liefern sowie kritische neue

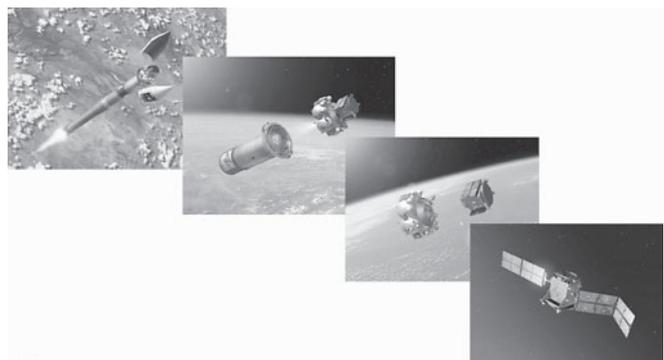


Abb. 3: Start von GIOVE-A (Quelle: ESA)

Technologien, wie z.B. Atomuhren, Bordinstrumente, Signalgeber und Empfänger testen. Für GIOVE-A wurde ein spezielles Bodensegment eingerichtet, welches eine experimentelle Präzisionszeitgeberstation beinhaltet und neben einem weltweiten Netz von Sensorstationen für die Erfassung der GALILEO Daten, ein Rechenzentrum im Europäischen Raumforschungs- und Technologiezentrum der ESA in den Niederlanden umfasst [10].

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

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

1.2 Architektur

Die wesentlichen Eigenschaften der GALILEO Systemarchitektur lassen sich wie folgt [11] zusammenfassen:

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

Man erkennt aus Abb. 4, dass die wesentliche Erweiterung von GALILEO gegenüber GPS in der Implementierung eines globalen/regionalen Segmentes zur Überwachung der Integrität besteht. Zielsetzung ist die Unterstützung der sicherheitskritischen Navigation der Luftfahrt (Landeinflug CAT I) sowie der Ortung und Führung von Zügen (Train Control) im schienengebundenen Landverkehr.

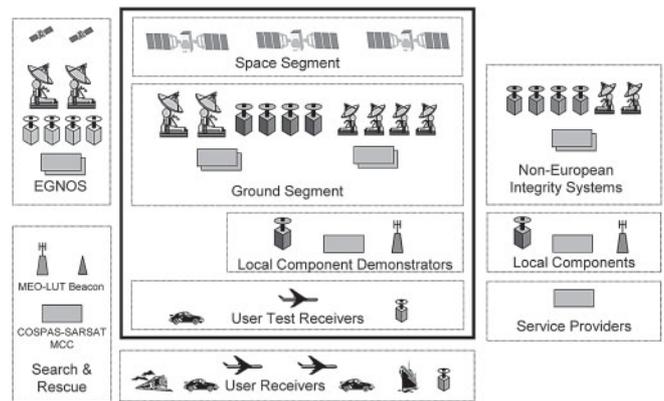


Abb. 4: Übersicht über die GALILEO Systemarchitektur

1.2.1 Raumsegment

Das Raumsegment [12] von GALILEO soll sich insgesamt aus 30 MEO (Medium Earth Orbit) Satelliten aufbauen, die als Walker 27/3/1 (+ 3 Ersatzsatelliten) Konstellation konfiguriert sind, d.h. auf drei Bahnebenen (Abb. 5b) verteilt sind. Die Bahnhöhe beträgt 23 616 km und die Neigung der Bahnebene 56° . Das Satellitendesign (Abb. 5a) basiert auf bereits durchgeführten Vorläuferprogrammen (z.B. GLOBALSTAR) inklusive kritischer Nutzlasttechnologien, die bereits in begleitenden ESA-Programmen entwickelt werden. Der GALILEO Satellit hat eine Masse von 625 kg, generiert eine Primärleistung von 1500 W und fällt mit linearen Abmessungen von $2.7 \times 1.2 \times 1.1 \text{ m}^3$ in die Kategorie von Minisatelliten. Der Satellit besitzt sämtliche Standardsysteme zur Bahn- und Lagekontrolle, Thermalkontrolle, usw. Hervorzuheben ist, im Gegensatz zu GPS, die Integration eines Laser Retroreflektors, um die Bahnbestimmung auch mit Laserentfernungsmessungen zu stützen.

Das Herzstück des GALILEO Satelliten stellt die Navigationsnutzlast dar. Bei der Nutzlast handelt es sich um einen regenerativen Transponder, bei dem moderne Digital- und Halbleitertechnik eingesetzt wird. Die Nutzlast baut sich aus Atomuhren (Clock Monitoring und Control Unit), dem Signalgenerator (Navigation Signal Generation Unit) mit Rechereinheit, dem Frequenzgenerator (FPGU), dem Endverstärker (Solid State Power Amplifier) und der L-Band Antenne auf. Als Atomuhren sollen zwei Rubidiumstandards ($5 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ über 100 s) und zwei Wasserstoffmaser ($5 \cdot 10^{-14} \text{ s}$ über 10 000 s) eingesetzt werden.

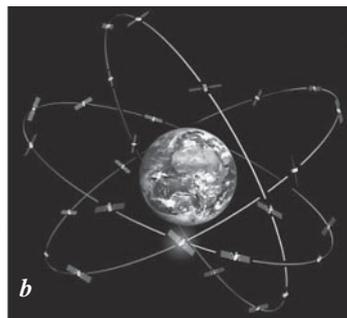
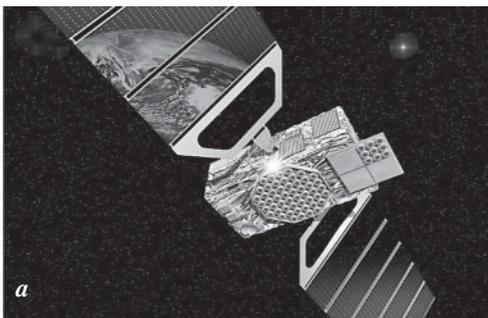


Abb. 5a: GALILEO Satellit
(Quelle: ESA)

Abb. 5b: GALILEO Raumsegment

1.2.2 Bodensegment

Wie bereits ausgeführt, baut sich das GALILEO Bodensegment [11] einmal aus dem Kontrollsegment für den Betrieb und die Bahn- und Zeitbestimmung (GCS oder Ground Control Segment) auf. Zum anderen besteht es aus dem System zur Überwachung der Integrität (IDS oder Integrity Determination System).

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

1.2.3 Nutzersegment

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

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



Abb. 6: GALILEO Bodensegment (Beispiel)

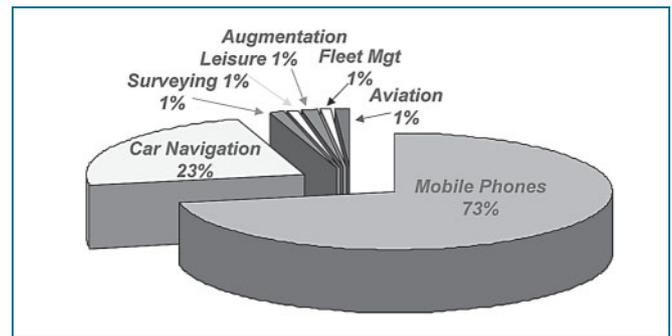


Abb. 7: Vorhersage des Europäischen GNSS Marktes im Jahr 2005 [8]

Landnavigation in bebauten Gebieten (Abschattungen, Multipath) Rechnung getragen.

1.2.4 Signale

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

Tab. 1: Ausgewählte Anforderungen an GALILEO [12]

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

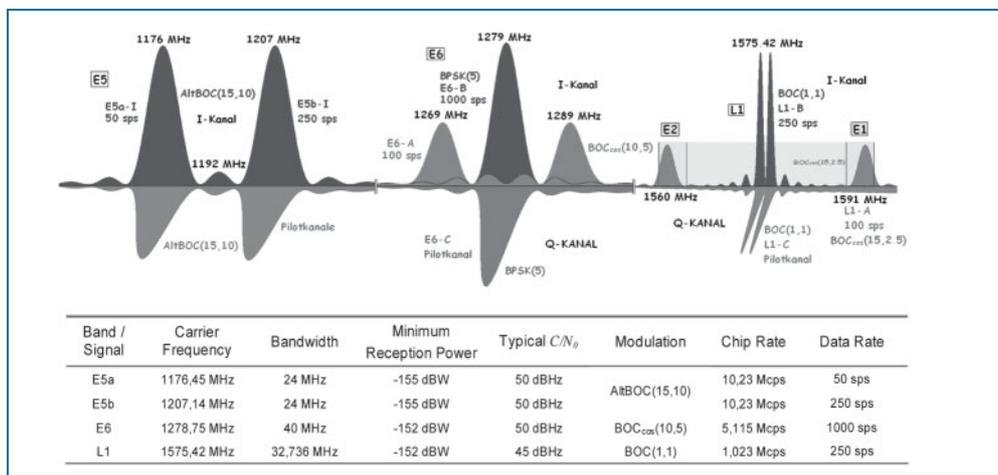


Abb. 8: Schematische Darstellung der GALILEO Signaldefinition [13] sowie Tabelle der Trägerfrequenzen und Signalparameter

Man sieht, dass bei GALILEO im Prinzip vier Frequenzbänder (siehe Tabelle zu Abb. 8) für Signale verwendet werden sollen, nämlich im unteren L-Band E_{5a} (überlagert mit GPS L_5) und E_{5b} von jeweils 24 MHz Bandbreite, im mittleren L-Band E_6 mit insgesamt 40 MHz Bandbreite und im oberen L-Band 32.7 MHz Bandbreite. Bewertet man die in Abb. 8 dargestellten Signale, so erkennt man, dass die Implementierbarkeit im unteren L-Band ($E_{5a}E_{5b}$) sehr gut durchführbar ist. Die Verwendbarkeit von E_6 – vorgesehen für den kommerziellen Dienst – ist fraglich, da in E_6 z.B. militärische und zivile Radarsysteme koexistieren (kein geschütztes Band). Problemstelle ist das obere L-Band, da hier das GALILEO Signal einerseits mit dem GPS C/A – Kode, andererseits mit dem neuen Militärsignal (M-Kode) verträglich sein muss.

Wie aus Abb. 8 entnommen werden kann, sind grundsätzlich folgende Modulationsverfahren vorgesehen:

- BPSK(10): Binäre Phasenumtastung mit 10.23 MHz
- BPSK(5): Binäre Phasenumtastung mit 5.115 MHz
- BOC(1,1): Binary Offset Carrier (Chip-Rate 1.023 MHz, Unterträger 1.023 MHz). Dieses Verfahren wird auch Manchester Kodierung genannt.
- BOC(15,2.5): Binary Offset Carrier (Chip-Rate 2.5575 MHz, Unterträger 15.3450 MHz)
- BOC(10,5): Binary Offset Carrier (Chip-Rate 5.115 MHz, Unterträger mit 10.23 MHz)

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

Bzgl. des Signals auf der ersten Frequenz sei angemerkt, dass von offizieller Seite die Terminologie „GALILEO L_1 “ zu Gunsten der Bezeichnung „GALILEO E_1 “ abgelöst wurde (Zentralfrequenz identisch mit GPS L_1 bleibt). Abb. 8 stellt insofern noch den Stand der Signaldefinitions-Richtlinie von etwa August 2006 dar.

1.2.5 MBOC – Modifiziertes Signal für GALILEO E_1 /GPS L_1

In jüngster Vergangenheit hat sich herauskristallisiert, dass von europäischer und amerikanischer Seite weiter Optimierungsbedarf für das Signal auf GPS L_1 bzw. GALILEO E_1 gesehen wird. Die beidseitigen Bemühungen sind nun dahin gemündet, dass BOC(1,1) für GALILEO E_1 OS und GPS L_{1C} durch MBOC(6,1,1/11) ersetzt wird. Die zugehörigen Signalspektren im Vergleich können in Abb. 9 betrachtet werden. Die Entscheidung über die Einführung von MBOC soll in den nächsten Wochen (max. Monaten) fallen. Es gilt als wahrscheinlich, dass die existierende Richtlinie zur Signaldefinition in dieser Hinsicht geändert wird.

Die noch aktuelle Richtlinie für GALILEO L_1 OS stammt aus dem von den USA und der EU am 26. Juni 2004 unterschriebenen „Agreement on the Promotion, Provision and Use of GALILEO and GPS Satellite-Based Navigation Systems and Related Applications“ [14], nachdem die EU und die USA sich darauf einigten, dieselbe Modula-

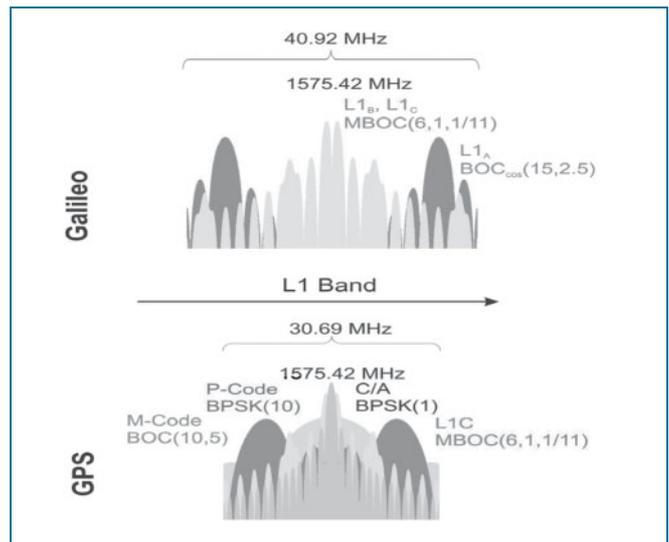


Abb. 9: Schematische Darstellung der vorgeschlagenen, modifizierten GALILEO Signalstruktur auf E_1 [15, 16]

tion BOC(1,1) auf L_1 zu verwenden. Trotzdem wurde im Agreement die Möglichkeit berücksichtigt, dass beide Parteien optimierte Signalstrukturen künftig implementieren könnten, solange diese auf BOC(1,1) basieren und die Kriterien des Agreements erfüllen würden.

Im März diesen Jahres haben Signalexperthen der USA und EU eine Alternative zu BOC(1,1) identifiziert [14, 17, 18], die die Bedingungen des Agreements erfüllen würden, nämlich MBOC(6,1,1/11) als eine vielversprechende Lösung für E_1 OS und GPS L_{1C} . Die Spektralleistungsdichte der optimierten E_1 OS und L_{1C} Modulation erhält die Kompatibilität mit BOC(1,1) Empfängern, während zusätzliche Signalkomponenten in höheren Frequenzen eine höhere Performance erlauben, z.B. zur Unterdrückung von Mehrweg-Fehlern. Außerdem wird die Flexibilität von L_1 OS mit MBOC höher sein als mit BOC(1,1). Die Spektralleistungsdichte von MBOC (multiplexed binary offset carrier) wird wie folgt definiert:

$$G_{Signal}(f) = \frac{10}{11} G_{BOC(1,1)}(f) + \frac{1}{11} G_{BOC(6,1)}(f), \quad (1)$$

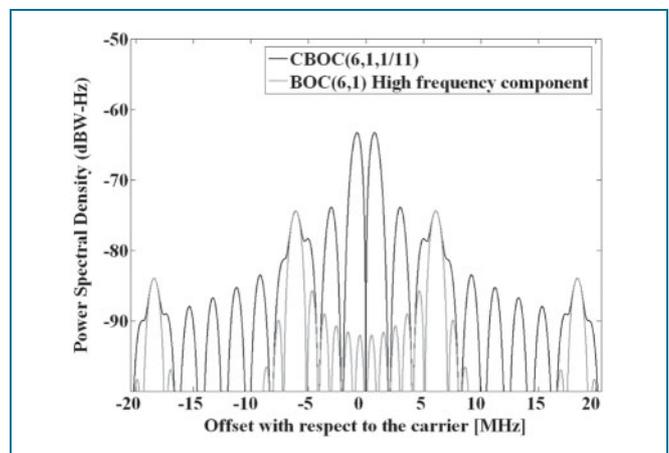


Abb. 10: Spektralleistungsdichte von MBOC. In hellgrau werden die höheren Frequenzen – BOC(6,1) vom BOC(1,1)-Kern separat gezeichnet



wobei $G_{BOC(m,n)}(f)$ die Spektralleistungsdichte der Sinus-BOC-Modulation bezeichnet. In Abb. 10 kann man erkennen, dass MBOC aus höheren Frequenzkomponenten besteht, was für eine höhere Positionierungsgenauigkeit sprechen sollte. Zur Implementation von MBOC werden z.Z. zwei Möglichkeiten berücksichtigt: TBOC und CBOC [18].

2 GALILEO Endgeräte

In diesem Abschnitt soll so kurz wie möglich skizziert werden, wie die Struktur der GALILEO Endgeräte vermutlich aussieht und welche Besonderheiten, die sich aus der Signalstruktur ergeben, bei der Implementierung zu beachten sind. In Abb. 11 ist ein Blockdiagramm eines GALILEO Empfängers dargestellt.

Die einzelnen Sub-Systeme:

- *RF-Front-End*: Für den GALILEO Hochleistungsempfänger sind mindestens vier verschiedene Trägerfrequenzen vorzusehen (E_{5a} , E_{5b} , E_6 und L_1). Dieser Forderung muss bei der Auslegung der Antenne und im Aufbau des Front-Ends (Hardware) Rechnung getragen werden.
- *Frequenzumwandlung*: Durch die Mehrfrequenzproblematik muss ein geeigneter Frequenzplan für das Herabsetzen der Trägerfrequenz (Down-Conversion) erarbeitet werden, der eine gute Empfangsqualität aller Signale gewährleistet.
- *A/D Wandlung*: Je nach Frequenzplan müssen ein oder mehrere A/D-Wandler eingesetzt werden. Es wäre möglich, die verschiedenen Bänder auf die gleiche Zwischenfrequenz zu konvertieren. Dadurch wäre nur ein einzelner A/D Wandler erforderlich. Hierdurch wird aber der Rauschpegel erhöht. Eine andere Möglichkeit wäre, alle Bänder getrennt zu digitalisieren.
- *Digitale Signalverarbeitung*:
 - Akquisition: Die Akquisition der BPSK-Signale kann auf konventionelle Weise erfolgen, d.h. wie bei GPS. Zur Akquisition der BOC-Signale muss ein neues Verfahren angewendet werden, das die Besonderheiten dieser Signalstruktur berücksichtigt.
 - Nachführen von Kode durch einen Delay-Lock-Loop (DLL): Das „Tracking“ der Codes kann weitgehend so durchgeführt werden wie bei konventio-

nellen GPS-Empfängern. Es sind jedoch Ergänzungen notwendig, um extreme BOC Signale, wie der BOC(15,2.5), stabil nachführen zu können (kleiner Linearbereich der S-Kurve, Mehrdeutigkeit der Autokorrelationsfunktion).

- Nachführen der Trägerphase durch einen Phase-Locked Loop (PLL): Die Einführung der Pilotsignale (ein datenloses Signal) erlaubt den Ersatz des Costas Regelkreises durch einen kohärenten PLL, der wesentlich stabiler ist.
- *Navigationsberechnung*: Die Berechnung der Position anhand der Rohdaten, kann prinzipiell wie bei GPS erfolgen. Es müssen allerdings die „Gruppenlaufzeiten“ zwischen den Trägern berücksichtigt werden.

3 GALILEO-Performance-Charakteristika

Wie bereits deutlich wurde, bieten die verbesserten Signalstrukturen von GALILEO ein Potential, das sowohl eine Verbesserung des Messrauschens der Streckenmessungen („Pseudo-Ranges“), als auch eine Verbesserung im Hinblick auf die Mehrweg-Problematik („Multipath“) zulässt. Neben diesen Vorteilen von GALILEO soll in diesem Kapitel aber auch auf den gesteigerten Nutzen einer kombinierten Auswertung von GPS- und GALILEO-Messungen eingegangen werden, die für viele Positionierungs-Anwendungen von großem Interesse sein wird. Die gemachten Angaben wurden in [19] dokumentiert und entstammen im Wesentlichen Arbeiten, die am Institut für Erdmessung und Navigation durchgeführt wurden.

3.1 Strecken- und Trägerphasenmessungen

3.1.1 Rauschen der Kode-Strecken

Die Eigenschaften der Signalstrukturen, die auf die GALILEO Trägerwellen aufmoduliert werden, erlauben die Ermittlung von Kode-Strecken auf einem bisher nicht erreichten, sehr niedrigen Rauschniveau. Tab. 2 und 3 stellen das Kode-Rauschen für die gegenwärtigen und zukünftigen GPS- denen der GALILEO -Signale gegenüber. Die in Tab. 2 und 3 enthaltenen Ergebnisse entstammen Simulationsrechnungen, die am Institut für Erdmessung und Navigation durchgeführt wurden [20]. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass hier das Empfänger-Rauschen charakterisiert wird und alle externen Effekte (bspw. die atmosphärische Refraktion) ohne Berücksichtigung bleiben. Es handelt sich bei den angegebenen Signalstärken um Angaben für optimale Bedingungen, d.h. um das minimal mögliche Rauschen. Horizontnah beobachtete Satelliten werden ein schlechteres C/N_0 -Verhältnis (Carrier-to-Noise) und damit auch ein höheres Rauschen aufweisen.

Die dramatische Verringerung des Rauschniveaus wird gewiss ihre Auswirkung auf kinematische Anwendungen haben. Insbesondere darf davon ausgegangen werden, dass für die Mehrdeutigkeits-Bestimmung verstärkt geometriefreie Ansätze angewendet werden. Allerdings werden sich Mehrweg-Effekte weiterhin störend bemerkbar

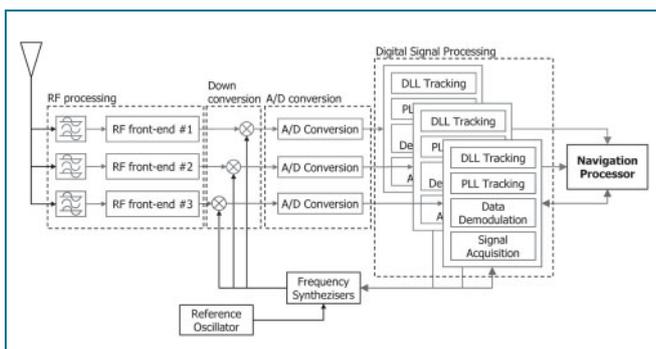


Abb. 11: Schematischer Aufbau eines GALILEO Empfängers

Tab. 2: Rauschen der Kode-Strecken für das gegenwärtige und zukünftige GPS- sowie für GALILEO-Empfänger bei einem typischen Träger-zu-Rauschverhältnis (C/N_0).

Signal	Modulation	Leistung [dB-W]	Bandbreite [MHz]	C/N_0 [dB-Hz]	Rauschen [m]
GPS C/A L_1	BPSK(1)	- 160	24	41,5	0,36
GPS C/A L_1	BPSK(1)	- 160	8	41,5	0,61
GALILEO L_1	BOC(1,1)	- 155	24	46,5	0,11
GALILEO L_1	BOC(1,1)	- 155	8	46,5	0,19
GALILEO E_6	BPSK(5)	- 155	24	46,5	0,09
GPS L_5	BPSK(10)	- 154	24	47,5	0,06
E_{5a} oder E_{5b}	AltBOC(15,10)	- 155	24	46,5	0,02

Tab. 3: Rauschen der Kode-Strecken für GPS- und GALILEO-Empfänger bei einem angenommenen Träger-zu-Rauschverhältnis (C/N_0) von einheitlich 45 dB Hz

Signal	Modulation	Leistung [dB-W]	Bandbreite [MHz]	C/N_0 [dB-Hz]	Rauschen [m]
GPS C/A L_1	BPSK(1)	- 160	24	45	0,24
GPS C/A L_1	BPSK(1)	- 160	8	45	0,41
GALILEO L_1	BOC(1,1)	- 155	24	45	0,14
GALILEO L_1	BOC(1,1)	- 155	8	45	0,23
GALILEO E_6	BPSK(5)	- 155	24	45	0,11
GPS L_5	BPSK(10)	- 154	24	45	0,08
E_{5a} oder E_{5b}	AltBOC(15,10)	- 155	24	45	0,02

machen und die Genauigkeit der Streckenmessung herabsetzen.

Abb. 12 illustriert die Daten für ausgewählte Signale. Es wird schnell deutlich, dass die GALILEO-Messungen ein deutlich geringeres Rauschniveau aufweisen werden als vergleichbare GPS-Signale. Die geringsten Werte für GPS werden bei L_5 erreicht, von GALILEO E_{5a} aber nochmals unterboten. Es sei erwähnt, dass gegenwärtig von amerikanischer Seite angedacht wird, im Rahmen der GPS-Modernisierung auf GPS L_1 zukünftig die Signalstruktur von GALILEO zu übernehmen, um so die offenkundigen Vorteile auch für GPS-Anwender ausnutzen zu können.

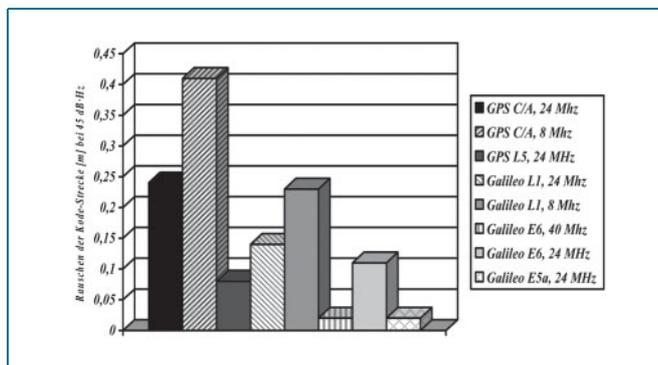


Abb. 12: Grafische Veranschaulichung des Rauschens der Kode-Strecken für ausgewählte GPS und GALILEO Signale. Eine Bandbreite zukünftiger Empfänger von 24 MHz gilt als realistisch

3.1.2 Trägerphasenmessungen

Eine einschneidende Genauigkeitssteigerung für Trägerphasenmessungen ist bei GALILEO im Vergleich zu GPS nicht zu erwarten, jedoch sollte folgende Feinheit Beachtung finden: Abb. 8 zeigt die beiden Signal-Komponenten, nämlich den I- und den Q-Kanal. Während Daten auf die I-Komponente aufmoduliert werden, bleibt der Quadratur-Kanal frei von Daten („data-free“ bzw. „data-reduced“), so dass das Trägerphasentracking kohärent durchgeführt werden kann.

Die Entfernung der Daten vom Signal hätte einen bestimmten Leistungsverlust zur Folge. Die so gewonnenen Trägerphasen wären bereits bei einem höheren Signal-Rausch-Verhältnis anfällig gegenüber Phasensprüngen, wohingegen die mit GALILEO realisierbare kohärente Trägerphasenverfolgung robuster bei niedrigerem Signal-Rausch-Verhältnis arbeitet. Diese Feststellung gilt in analoger Weise auch für die L_5 -Signale des modernisierten GPS III.

3.1.3 Einfluss der Ionosphäre

Wie hinreichend bekannt ist, kann durch die Kombination der Messungen auf 2 Frequenzen der Ionosphärenfehler erster Ordnung eliminiert werden. Aus der vereinfachten Beobachtungsgleichung

$$S_i = \rho + c_1 / f_i^2 \tag{2}$$

mit S_i als Streckenmessung auf Frequenz f_i und ρ als wahre geometrische Entfernung zwischen Empfänger und

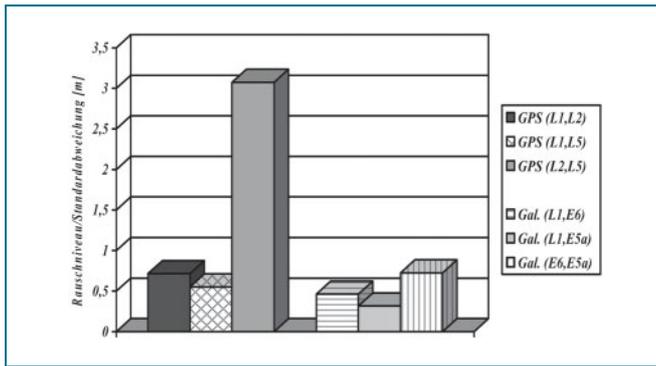


Abb. 13: Rauschen der ionosphärenfreien Streckenmessungen (Effekt erster Ordnung; Rauschniveau gemäß Tab. 3)

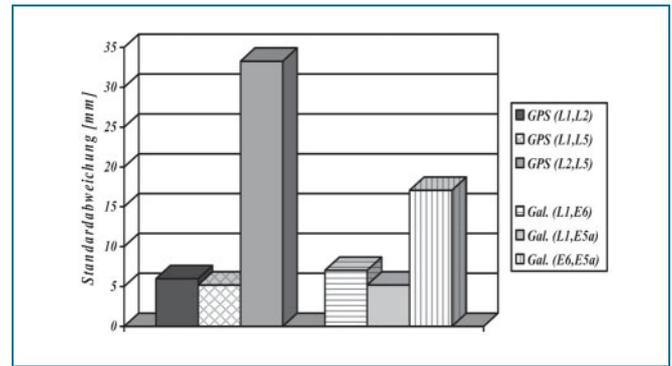


Abb. 14: Standardabweichung der ionosphärenfreien Linearkombinationen (Effekt erster Ordnung; angenommene Standardabweichung der eingehenden Trägerphasen: einheitlich 2 mm)

Satellit sowie c_1/f_1^2 als Ionosphärenfehler erster Ordnung ergibt sich die ionosphärenfreie Strecke zu

$$\rho = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \cdot S_1 - f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \cdot S_2 \quad (3)$$

Abb. 13 zeigt, wie sich das Rauschen der ionosphärenfreien Streckenmessungen im Vergleich zu den Ausgangswerten in Tab. 3 erhöht. Abb. 14 veranschaulicht die Situation für die Trägerphasen, wobei dort einheitlich eine Standardabweichung von 2 mm angenommen wurde (inkl. externer Effekte).

Es liegt auf der Hand, dass diejenigen Zweifrequenz-Kombinationen, deren Frequenzen am nächsten zusammenliegen, auf Grund ihrer Fehlerfortpflanzung die größten Standardabweichungen aufweisen werden. Dies sind für GPS die $L_2 - L_5$ -Kombination und für GALILEO $E_6 - E_{5a}$. Die günstigsten Kombinationen ergeben sich für beide Satellitennavigationssysteme für $L_1 - L_5$ bzw. $L_1 - E_{5a}$ (maximaler Frequenzabstand).

3.2 Reduktion von Mehrwege-Effekten

Der Einfluss von Mehrwegesignalen ist in starkem Maße von der Signalstruktur abhängig. Als wichtigste Parameter sind in diesem Zusammenhang die verwendete Modulationsart, die Bandbreite des empfangenen Signals sowie die Coderate zu nennen. Aber auch die Auslegung der Re-

gelschleife (verwendete Diskriminatoren, Korrelatorabstände oder Rauschbandbreiten) sowie die Eigenschaften der Empfangsumgebung (Anzahl und Dämpfung der auftretenden Umwegsignale, Entfernung der potenziellen Reflektoren von der Antenne) spielen eine nicht unbedeutende Rolle. Mehrwege-Effekte sind räumlich unkorreliert und lassen sich nicht durch differenzielle Methoden reduzieren, so dass sie eine wesentliche Fehlerquelle bei der präzisen Positionsbestimmung mit GPS darstellen können. Allerdings besitzen praktisch alle auf dem Markt befindlichen Empfänger bereits entsprechende Signalverarbeitungsalgorithmen, die zu einer spürbaren Reduktion dieses Fehlereinflusses führen. Die beiden wichtigsten seien an dieser Stelle etwas näher erläutert:

Enger Korrelator: Als Quasi-Standard in der Empfänger-technologie hat sich die Technik der engen Korrelation durchgesetzt, die bereits 1992 vorgeschlagen wurde und bspw. von der Firma NovAtel in ihren GPS-Empfängern implementiert wird [21]. Dabei wird die „frühe“ und „späte“ Korrelation nicht mit einem Chipabstand von 1, sondern mit einem deutlich geringeren Abstand von typischerweise 0,1 chips durchgeführt. Die daraus abgeleitete Diskriminatorfunktion führt zu einer signifikanten Reduktion der Mehrwege-Fehler (unter der Annahme einer idealen, nicht bandbegrenzten Korrelationsfunktion um einen

Tab. 4: Maximale (Einhüllende) und repräsentative mittlere Mehrwege-Fehler für GPS und GALILEO Beobachtungen bei Verwendung „enger“ Korrelation zur Mehrweg-Reduktion.

Signal	Modulation	Bandbreite [MHz]	Max. Fehler [m]	Repräsentative Mittelwerte [m]			
				Open	Rural	Suburban	Urban
GPS C/A	BPSK(1)	8	12,0	0,24	2,04	0,87	4,85
GALILEO L_1	BOC(1,1)	8	12,0	0,24	2,04	0,87	4,85
GALILEO C/A	BPSK(1)	24	6,9	0,20	1,39	0,59	3,35
GALILEO L_1	BOC(1,1)	24	6,9	0,20	1,39	0,59	3,35
GALILEO L_1	MBOC(6,1,1/11)	24	5,2	0,17	0,85	0,36	2,04
GALILEO E_6	BPSK(5)	24	4,00	0,14	0,80	0,34	1,97
GPS L_5	BPSK(10)	24	4,51	0,15	0,54	0,23	1,42
E_{5a} oder E_{5b}	AltBOC(15,10)	24	1,62	0,04	0,11	0,05	0,30
$E_{5a/b}$	AltBOC(15,10)	51	1,62	0,04	0,11	0,05	0,30

Faktor 10). Da auch die Varianz des thermischen Rauschens direkt proportional zum Chipabstand ist, ergibt sich unter Verwendung solcher geringer Korrelatorabstände auch ein deutlich reduzierter Rauscheinfluss.

HRC/ $\Delta\Delta$ -Korrelator: Unter diesem Namen werden spezielle Kode Diskriminatoren verstanden, die durch zwei Paare von frühen und späten Korrelationszeitpunkten gebildet werden. Im Gegensatz zum engen Korrelator, welcher mit insgesamt 3 Korrelatoren auskommt (1 \times „früh“ – 1 \times „pünktlich“ – 1 \times „spät“), stützt sich das $\Delta\Delta$ -Konzept auf 5 Korrelatoren (2 \times „früh“ – 1 \times „pünktlich“ – 2 \times „spät“). Das Konzept wird in der Literatur gelegentlich auch als „High Resolution Correlator“ (HRC) bezeichnet und von diversen Empfängerherstellern unter unterschiedlichen Bezeichnungen (z.B. *Strobe Correlator* oder *Pulse Aperture Correlator(PAC)*) in deren jeweilige Empfänger implementiert ([22–24]).

Daneben existieren weitere, allerdings weniger weit verbreitete Ansätze zur Mehrwegereduzierung auf der Basis von geeigneten Signalverarbeitungsalgorithmen. Hierzu gehören insbesondere Methoden, die die Form der Korrelationsfunktion durch Abtastung mittels mehrerer Korrelatoren analysieren und daraus auf einen vorhandenen Mehrwegeeinfluss schließen (z.B. Early/Late Slope Technique [25], MEDLL [26–28] oder E1/E2 Tracking [29]).

3.2.1 Mehrwegeeinflüsse auf Kode-Beobachtungen

Tab. 4 fasst maximale und mittlere zu erwartende Mehrwege-Fehler zusammen. Neben den zu erwartenden maximalen Fehlereinflüssen wurden auch repräsentative Mittelwerte für typische Mehrwegeumgebungen (open, rural, suburban, urban) berechnet. Es zeigt sich, dass der Mehrweg eine Fehlerwirkung haben kann, die weitaus größer als die des Empfänger-Rauschens ist. Diese Aussage gilt für GPS und GALILEO, auch wenn die GALILEO Signalstrukturen – mit Ausnahme der BOC(1,1) Modulation auf L_1 – grundsätzlich ein etwas günstigeres Verhalten zeigen.

Der in Tab. 4 angegebene maximale Fehler ergibt sich aus dem betragsmäßigen Maximum der Einhüllenden für alle möglichen geometrischen Umwege bei einem angenommenen Reflexionskoeffizienten von $\alpha = 0,5$. Die repräsentativen Mittelwerte beziehen sich auf verschiedene Umgebungen, wie sie für statistische Kanalmodelle klassifiziert werden [30, 31]. Sie basieren auf typischen Werten für die Dämpfung (signal-to-multipath ratio, SMR) und den geometrischen Umweg eines Mehrwegesignals bei einer angenommenen Signalelevation von 25° . Diese Parameter können aus dem statistischen Kanalmodell abgeleitet werden und sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Umgebung	Mehrwegeparameter für $E = 25^\circ$	
	Mittleres SMR	Typ. Umweg
Open	27.5 dB	26 m
Rural	13.5 dB	57 m
Suburban	20.5 dB	56 m
Urban	numsp;6.0 dB	51 m

Die BOC(1,1) Modulation für das GALILEO Open Service Signal auf L_1 gilt zwar derzeit noch als Baseline, dennoch wurden in den letzten Monaten umfangreiche Studien für eine weitere Optimierung des Signals durchgeführt. Tab. 4 enthält die maximalen und mittleren zu erwartenden Mehrwegefehler für ein solches Signal mit im Vergleich zum BOC(1,1) optimierter Modulationsform (MBOC). Bei gleicher Signalbandbreite lässt sich durch die Optimierung ein deutlich verbessertes Mehrwegeverhalten konstatieren. Details zur MBOC-Modulation finden sich in [16] oder [32].

Die geringsten Mehrwegefehler sind beim Einsatz des GALILEO E_5 Signals zu erwarten, wobei die Verwendung des gesamten E_5 -Bandes (E_{5ab}) gegenüber des schmalbandigeren E_{5a} oder E_{5b} Signals hinsichtlich der zu erwartenden Mehrwegefehler keine Verbesserung mit sich bringt.

3.2.2 Mehrwegeeinflüsse auf Trägerphasen-Beobachtungen

Die Anfälligkeit der Trägerphasenmessungen gegenüber Mehrwegen hängt ebenfalls von der verwendeten Signalstruktur ab. Einen Blick auf die Trägerphasen gestatten die Diagramme in Abb. 15 für den „engen“ sowie Abb. 16 für den $\Delta\Delta$ -Korrelator. Die zugrunde liegenden Berechnungen basieren auf einer Empfängerbandbreite von 24 MHz sowie der Annahme, dass das direkte Signal mit nur einem Umwegsignal überlagert ist. Das Amplitu-

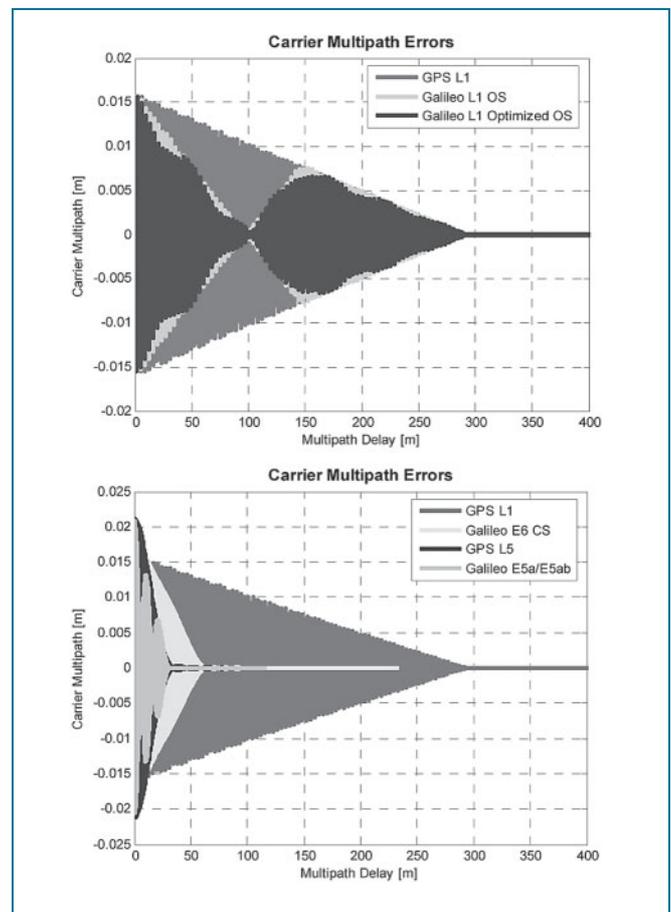


Abb. 15: Mehrwege-Fehler für Trägerphasen als Funktion des Umwegs („Multipath Delay“) bei Verwendung des „engen“ Korrelators

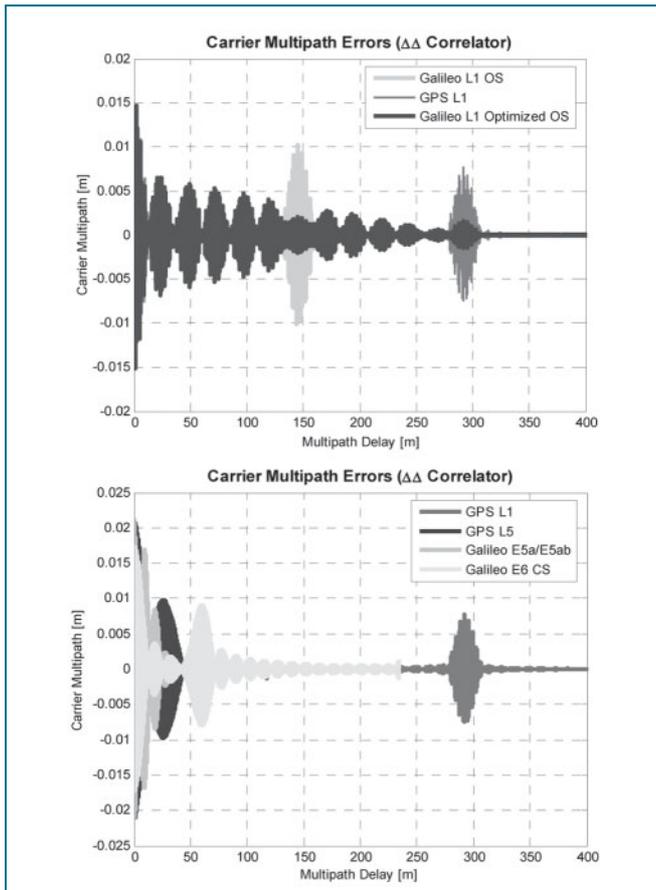


Abb. 16: Mehrwege-Fehler für Trägerphasen als Funktion des Umwegs („Multipath Delay“) bei Verwendung des HRC-/ $\Delta\Delta$ -Korrelators

denverhältnis zwischen direktem Signal und Umwegsignal beträgt in diesem Fall 0,5. Unterscheidungen hinsichtlich unterschiedlicher Mehrwegeumgebungen wurden in diesem Fall nicht vorgenommen.

Mehrwege-Fehler auf der GALILEO L_1 -Trägerphase (mittelgraue Kurve in Abb. 15) überdecken eine geringere Fläche als im Fall der GPS L_1 -Trägerwelle (C/A-Kode). Ein genauer Vergleich zwischen dem GPS L_1 und dem GALILEO L_1 Signal zeigt, dass die Einhüllende des Mehrwegefehlers für das GALILEO -Signal nur 68 % der Fläche des GPS L_1 Signals beansprucht (Flächenindex), was als eine Verbesserung der Mehrwegeigenschaften interpretiert werden kann. Die unterschiedlichen Formen der Fehlerdiagramme resultieren aus den verschiedenen Modulationsformen. Die Eigenschaften der BOC-Modulation führen beispielsweise dazu, dass der resultierende Mehrwegefehler bei einem geometrischen Umweg von ungefähr 100 m auf Null zurückgeht. Die GALILEO E_6 -Messungen weisen einen Flächenindex von lediglich 22 % im Vergleich zu GPS L_1 auf, wenn der Standardalgorithmus zur Mehrweg-Reduktion eingesetzt wird.

Bei Verwendung des $\Delta\Delta$ -Korrelators ergibt sich ein etwas komplizierteres Bild: Hier führt die Verwendung der BOC-Modulation zu zusätzlichen Maxima der Mehrwegefehler, so dass im Bereich dieser zusätzlichen Maxima größere Fehler als unter Verwendung der bei GPS verwendeten BPSK Modulation entstehen können (s. Abb. 16 oben).

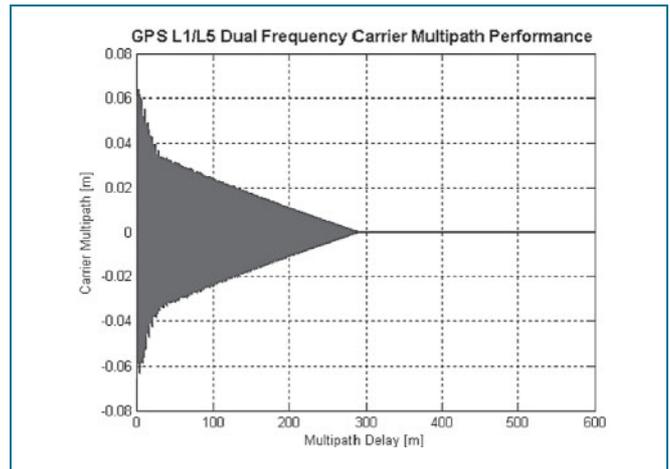


Abb. 17: Mehrweg-Fehler für die ionosphärenfreie GPS-Li-nearkombination bei Verwendung des „engen“ Korrelators

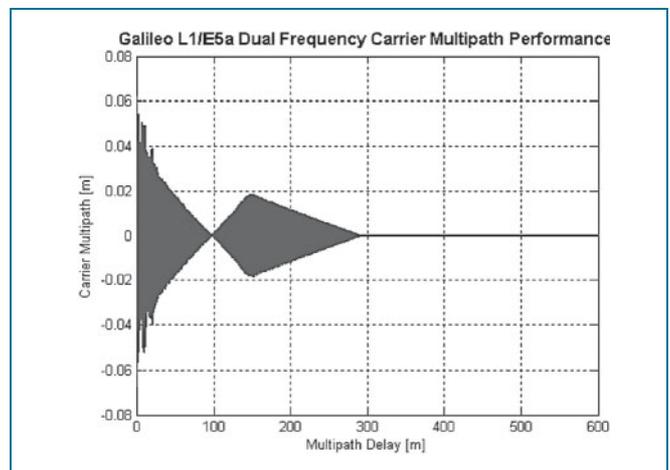


Abb. 18: Mehrweg-Fehler für die ionosphärenfreie GALILEO -Linearkombination bei Verwendung des „engen“ Korrelators

Auch hier bringt die Verwendung des breitbandigen E_{5ab} Signals hinsichtlich Mehrwegefehler keine Verbesserung gegenüber E_{5a} oder E_{5b} . Da die maximalen auftretenden Mehrwegefehler auf der Trägerphase abhängig von der Trägerwellenlänge sind, erhält man für die E_6 und E_5 -Signale erwartungsgemäß höhere Maximalfehler als für L_1 . Schließlich sei noch ein Blick auf die ionosphärenfreie Linearkombination (GPS: $L_1 - L_5$, Abb. 17; GALILEO: $L_1 - E_{5a}$, Abb. 18) gestattet. Ein deutlicher Vorteil der GALILEO-Signale wird dabei ersichtlich.

3.3 Kombination von GPS und GALILEO

Ein wesentlicher Vorteil bspw. für die kinematische GNSS-Positionierung wird sich aus der kombinierten Nutzung von GPS- und GALILEO-Signalen ergeben. Dabei wurde auch bereits deutlich, dass die Integration der beiden Systeme in einem Empfänger vergleichsweise einfach sein wird, denn GPS L_1 und GALILEO L_1 liegen auf identischen Zentralfrequenzen, ebenso wie GPS L_5 und GALILEO E_{5a} .

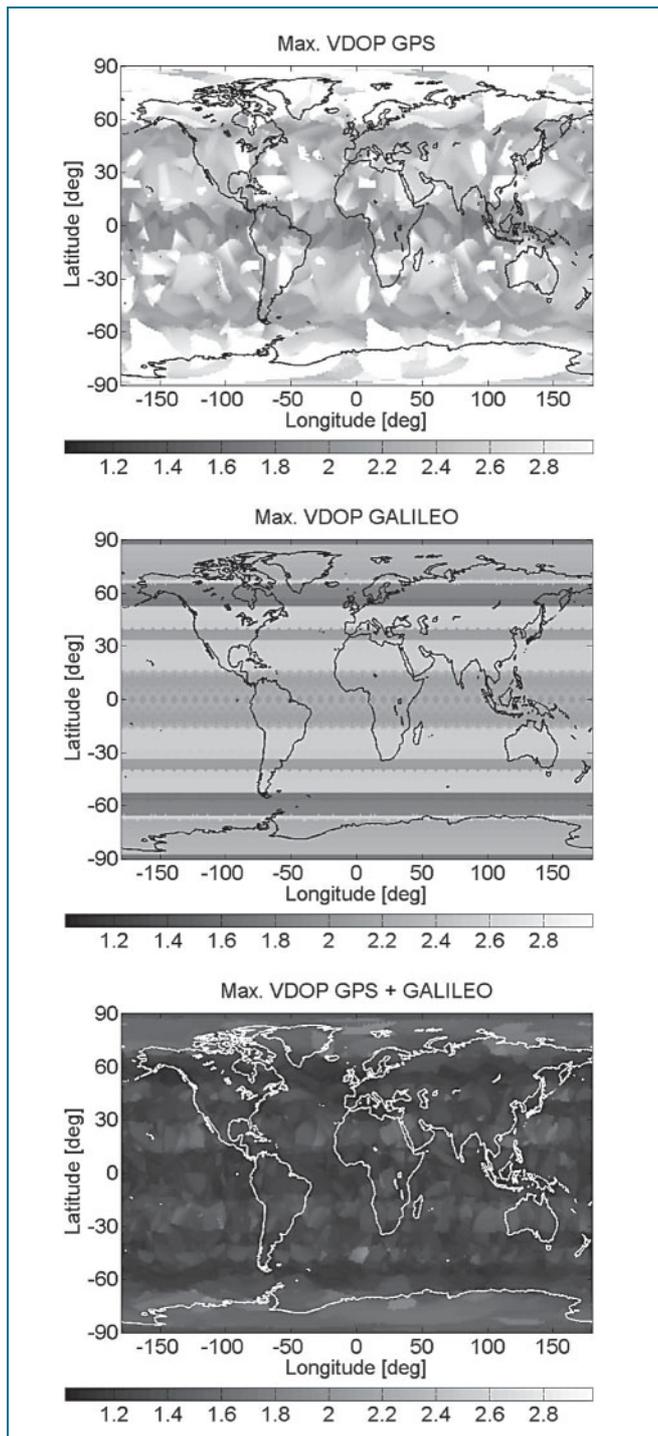


Abb. 19: Beispiel für die Verbesserung des geometrisch bedingten Positionsfehlers (VDOP: vertical dilution of precision, bezieht sich auf Höhen-Koordinate); zunächst die GPS-Konstellation allein betrachtet, dann GALILEO separat und schließlich GPS und GALILEO in Kombination. (Worst-Case-Scenario; einheitliche Farbskala für alle 3 Abbildungen)

3.3.1 Verbesserte Geometrie

Ein ganz wesentlicher Vorteil der Kombination der beiden Systeme liegt auf der Hand: Die Anzahl der gleichzeitig beobachteten Satelliten wird sich in etwa verdoppeln, was zu einer Reduktion des DOP-Faktors („Dilution of Preci-

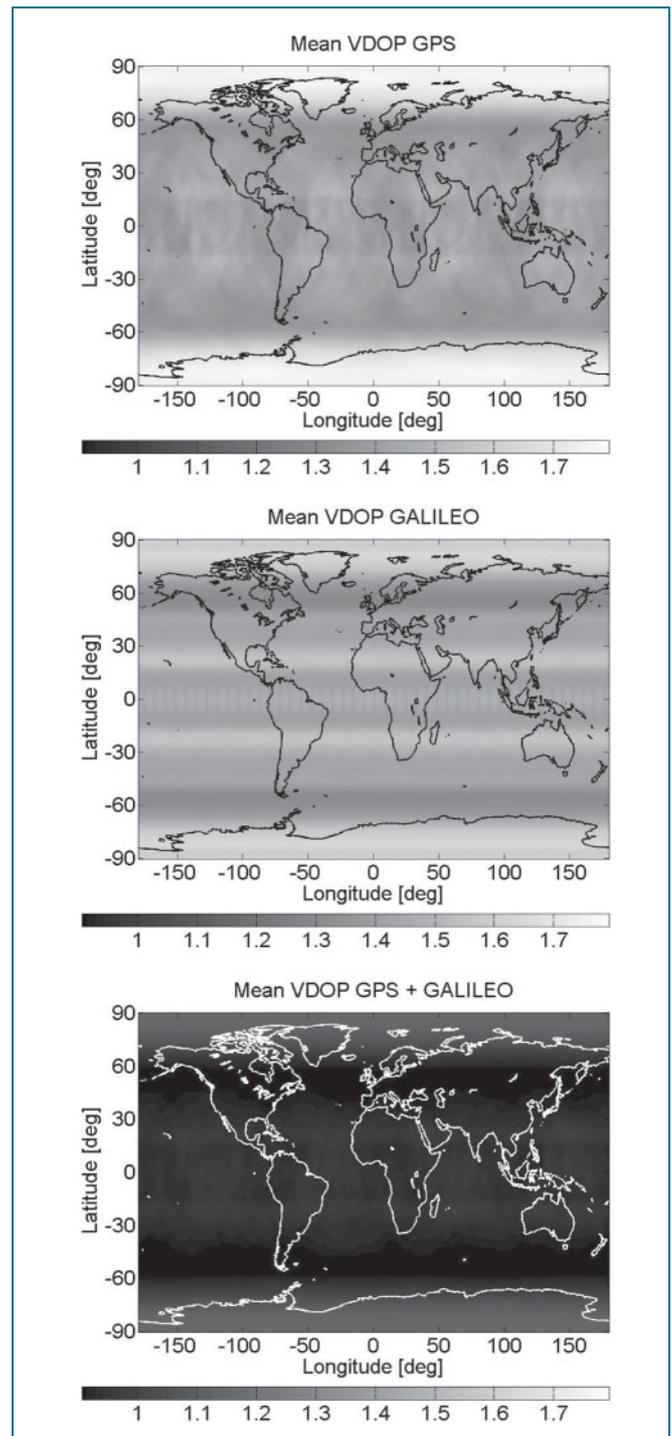


Abb. 20: Mittelwerte für den VDOP bei reiner GPS- bzw. GALILEO-Konstellation und der Kombination von GPS und GALILEO

sion“) um eben bis zu einem Faktor von ca. 2 führen kann (homogene Verteilung der Satelliten vorausgesetzt). Die verbesserte Geometrie erlaubt somit eine erheblich präzisere Lösung. Selbst wenn keine neuen Algorithmen zur Positionierung entwickelt würden, ergäbe sich somit durch die gemeinsame Nutzung von GPS- und GALILEO-Messungen (auch lediglich im Zweifrequenz-Modus) eine deutliche Verbesserung. Dieser Geometrie-Effekt wurde in einer Studie [20] genauer untersucht. Nach-

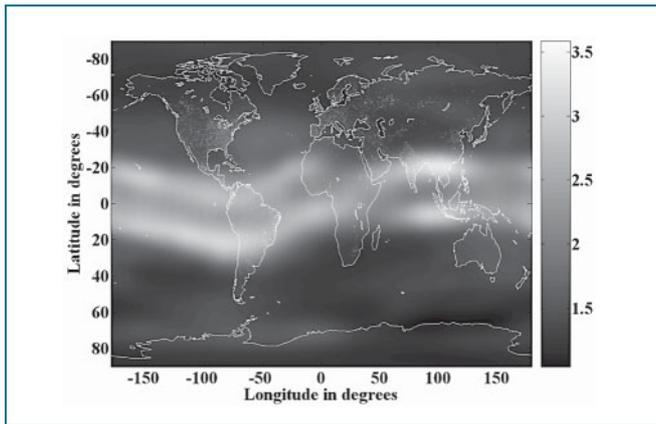


Abb. 21: Typischer horizontaler Positionierungsfehler in [m] für einen GALILEO BOC(1,1) Empfänger mit einer Bandbreite von 24 MHz – Einfrequenzsystem, stellvertretend für Massenmarktanwendungen. (atmosphärische Effekte berücksichtigt, Ionosphärenfehler deutlich sichtbar; ebenfalls berücksichtigt: typische Mehrweg-Fehler in städtischen Gebieten)

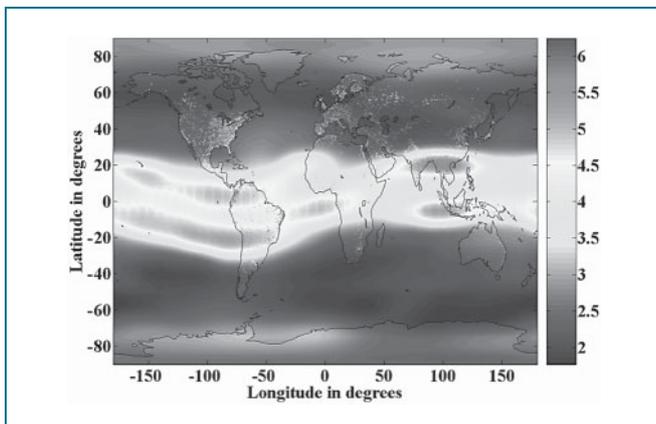


Abb. 22: Typischer vertikaler Positionierungsfehler in [m] für einen GALILEO BOC(1,1)-Empfänger. (Bandbreite: 24 MHz, Atmosphärenfehler und Mehrweg berücksichtigt)

folgend werden die Effekte bzgl. der Höhenkomponente – die bei der Satellitennavigation kritischer ist als die Horizontalkomponente – dargestellt (zuerst die maximalen Werte und dann die Mittelwerte).

Zunächst wird deutlich, dass sich auch bei alleiniger Nutzung von GALILEO durch die im Vergleich zu GPS optimierten Orbitparameter eine durchaus signifikante Verbesserung des VDOP (Vertical Dilution of Precision) ergibt. Bei Kombination von GPS und GALILEO erfolgt dann eine Reduktion auf einen VDOP, der in vielen Regionen bzw. über weite Beobachtungsspannen einen Wert von 1,5 unterschreitet, was eine substantielle Verbesserung bedeutet.

Diese Tatsache macht sich unmittelbar in den erzielbaren Erfolgsraten bei der geometriebasierten Mehrdeutigkeitsfixierung bemerkbar, die bei kürzeren Basislinien sehr stark ansteigt; siehe dazu bspw. [33] und [34]. Bei längeren Basislinien verliert sich der Vorteil wegen der höheren Dominanz der atmosphärischen Refraktion, die nach wie vor ein Problem bleibt.

3.3.2 Fixierung mit Signalen auf drei Frequenzen

Die Verfügbarkeit von mindestens drei Signalen eröffnet neue Möglichkeiten der geometriefreien Mehrdeutigkeitsbestimmung, die für die kinematische Positionierung hochgradig relevant sind. Das Konzept ist unter der Abkürzung TCAR (Triple Carrier Phase Ambiguity Resolution) bzw. allgemein MCAR (Multiple Carrier Phase Ambiguity Resolution) bekannt und kann kurz folgendermaßen zusammengefasst werden; siehe auch [35]: Zunächst wird zwischen den beiden Signalen, deren Frequenzen am engsten beieinander liegen, eine sog. „Super Wide Lane“: (spezielle Linearkombination, die sich aus der Subtraktion der Phasen auf den zwei betrachteten Frequenzen ergibt) gebildet, die eine besonders hohe Wellenlänge aufweist und damit aus der Kombination von Strecken- und Trägerphasenmessungen sehr schnell – bei geringem Mehrwegfehler sogar instantan – festgesetzt werden kann. Anschließend wird auf die „Wide Lane“ übergegangen. Sind deren Mehrdeutigkeiten gelöst, erfolgt der letzte Schritt in Form der „Medium Wide Lane“. Konnten die Mehrdeutigkeiten all dieser Linearkombinationen bestimmt werden, so können die Mehrdeutigkeiten der Originalträgerwellen auf einfache Weise ermittelt werden. Für GPS ergibt sich folgende Aufstellung; siehe auch [36]: Als „Super Wide Lane“ käme $L_2 - L_5$ zur Anwendung mit einer virtuellen Wellenlänge von 5,86 m, gefolgt von der bisher bereits genutzten „Wide Lane“ $L_1 - L_2$ mit der Wellenlänge von 0,86 m. Schließlich kann noch $L_1 - L_5$ mit einer Wellenlänge von 0,75 m gebildet werden. Auf Grund des höheren Rauschniveaus dieser Linearkombinationen im Vergleich zu den Originalsignalen kann in der Praxis nicht grundsätzlich mit einer instantanen Mehrdeutigkeitslösung gerechnet werden, aber es besteht die realistische Chance einer schnellen Lösung, ggf. auch über die Kombination geometriefreier mit geometriebasierten Methoden.

Im GALILEO-Fall kann von folgender Kaskade ausgegangen werden: Kann die „Super Wide Lane“ nur über $E_6 - E_{5a}$ gebildet werden, so ergäbe sich eine virtuelle Wellenlänge von 2,93 m, bei Verwendung von $E_6 - E_{5b}$ immerhin 4,19 m. Die „Wide Lane“ folgt mit $L_1 - E_6$ (Wellenlänge: 1,01 m) und die „Medium Wide Lane“ schließlich mit $L_1 - E_{5a}$ (Wellenlänge: 0,75 m) bzw. $L_1 - E_{5b}$ (Wellenlänge: 0,81 m). Der technische Stand der Empfängertechnologie lässt allerdings erwarten, dass hochwertige (und somit vergleichsweise teure) Empfänger auch das komplette E_{5ab} -Breitbandsignal tracken können (nicht nur die Sub-Carrier E_{5a} und E_{5b}), was interessante Implikationen für die Mehrdeutigkeitslösung bereithält und weiterhin für Nahbereichsanwendungen Messgrößen mit einem – bislang nie dagewesenen – niedrigen Mehrwege-Fehler bereitstellen kann. Es wäre damit auch möglich, auf das kommerzielle (d.h. kostenpflichtige) E_6 -Signal zu verzichten.

4 Abschließende Bemerkungen

Die Entwicklung des weltraumbasierten Navigationssystems GALILEO stellt eine enorme technologische und finanzielle Herausforderung für Europa dar. Auf

der anderen Seite ist jedoch eine erhebliche Steigerung der Leistungsparameter (Genauigkeit, Verfügbarkeit, Integrität, Kontinuität) der Satellitennavigation für fast alle Anwender zu erwarten. Viele Anwendungen von GPS, die zurzeit noch gewissen Beschränkungen unterliegen, werden in Zukunft durch zusätzliche GALILEO Satelliten wesentlich besser möglich sein als dies heute der Fall ist. Die kompatible Verwendung der L_1 Frequenz für GPS und GALILEO ist eine gute Nachricht für die Hersteller von Massenmarktempfängern, da beide Systeme mit gleicher Antenne und gleichem Front-End empfangen werden können. Unterschiede in den Signalen haben nur Auswirkungen auf den Digitalteil, was jedoch relativ unkritisch ist. Auch hochpräzise Anwendungen werden, neben einer generell verbesserten Geometrie bei kombinierter Auswertung, durch Verwendung von 3 Signalen und mehr von einer schnelleren bzw. robusteren Mehrdeutigkeitsfixierung profitieren, auch wenn das Problem der atmosphärischen Refraktion bestehen bleibt, regionale Netzwerke insofern also weiterhin von Bedeutung bleiben werden. Zukünftige Zweifrequenz-Empfänger dürften mit der GPS-Modernisierung mehr und mehr die klassischen $L_1 - L_2$ - zu Gunsten von $L_1 - L_5$ -Empfängern ablösen, da identische Zentralfrequenzen mit GALILEO L_1 bzw. E_{5a} vorliegen.

Literatur

- [1] European Commission: GALILEO, Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services, Communication 54, Brüssel, 9. Februar, 1999
- [2] Belgian EU Presidency, European Council of Laeken: Presidency Conclusions, No. 33, Laeken, 14.–15. Dezember 2001
- [3] Alenia, Alcatel, Dornier Satellitensysteme, Matra Marconi Space: GNSS-2 Comparative System Study, Final Presentation, Noordwijk, 7. Dezember 1999
- [4] Price Waterhouse Coopers: Inception Study to Support Development and Business Plan for the GALILEO Programme, Executive Summary, TREN/B2/23-2001, 20. November 2001
- [5] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Deutschland unterstützt die Entwicklung der europäischen Satellitennavigation, Pressemitteilung, Nr.: 054/02, Berlin, 27. Februar 2002
- [6] SASSEN, S.: GALILEO Concession and Current Status, 10. Januar 2006, GALILEO Infotag, Bonn
- [7] Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat, Stand des Programms GALILEO, KOM(2006) 272 endgültig, 7. Juni 2006, Brüssel
- [8] EISSFELLER, B.; DEISTING, B.: Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO, Heft 3 – 3. Quartal 2006, Mitteilungen DVW Bayern e.V.
- [9] PAFFET, J.: GIOVE-A The First GALILEO Satellite In Space, 21.–23. Februar 2006, Munich Satellite Navigation Summit 2006
- [10] Europäische Kommission, Generaldirektion Energie und Verkehr: GALILEO auf Kurs – GIOVE-A-Satellit im Orbit, Pressemitteilung, IP/05/1712, Brüssel, 28. Dezember 2005
- [11] WEBER, T.; TRAUTENBERG, H.L.; SCHÄFER, Chr.: GALILEO System Architecture – Status and Concepts, Proceedings ION GPS 2001, Salt Lake City
- [12] BENEDICTO, J.; DINWIDDY, S.E.; GATTI, G.; LUCAS, R.; LUGERT, M.: GALILEO: Satellite Design and Technology Developments, European Space Agency, Noordwijk, November 2000
- [13] HEIN, G.W.; GODET, J.; ISSLER, J.-L.; MARTIN, J.-Chr.; LUCAS, R.; PRATT, T.: The GALILEO Frequency Structure and Signal Design, Proceedings ION GPS 2001, Salt Lake City
- [14] <http://pnt.gov/public/docs/2004-US-EC-agreement.pdf>
- [15] AVILA-RODRIGUEZ, J.A. et al.: MBOC: The New Optimized Spreading Modulation Recommended for GALILEO L1 OS and GPS L1C, Inside GNSS, May issue 2006
- [16] HEIN, G.W. et al.: MBOC: The New Optimized Spreading Modulation Recommended for GALILEO L1 OS and GPS L1C, Proceedings of ION PLANS 2006, 24.–27. April 2006, Loews Coronado Bay Resort, San Diego, California
- [17] <http://gps.losangeles.af.mil/engineering/icwg/Docs/WGA%20Signed%20Recommendation%20on%20MBOC%20-%202023%20Mar%2006.pdf>
- [18] HEIN, G.W.; AVILA-RODRIGUEZ, J.-A.; WALLNER, S.; PRATT, A.R.; OWEN, J.; ISSLER, J.-L.; BETZ, J.W.; HEGARTY, Ch.J.; LENAHAN, S.; RUSHANAN, J.J.; KRAAY, A.L.; STANSELL, T.A.: MBOC: The New Optimized Spreading Modulation Recommended for GALILEO L1 OS and GPS L1C, Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006 – 24.–27. April 2006, San Diego, California, USA.
- [19] SCHÜLER, T.; IRSIGLER, M.; KRUEGER, E.; HEIN, G.W.: GALILEO – Das Satellitennavigationssystem Europas und sein Nutzen für die Hydrographie, Beiträge zum 64. DVW-Seminar und zum 20. Hydrographentag 2005, 6.–8. Juni 2005, Wilhelmshaven, Schriftenreihe des DVW, Band 47/2005, ISBN 3-89639-480-0, S. 81–103, Wißner-Verlag
- [20] AVILA-RODRIGUEZ, J.-A.; HEIN, G.W.; WALLNER, S.; SCHUELER, T.; SCHUELER, E.; IRSIGLER, M.: Revised Combined GALILEO /GPS Frequency and Signal Performance Analysis, Proceedings ION-GNSS 2005, 13.–16. September, 2005, Long Beach, California
- [21] VAN DIERENDONCK, A.J.; FENTON, P.; FORD, T.: Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver, Navigation 39, No. 3, Fall 1992, S. 265–283
- [22] GARIN, L.; VAN DIGGELEN, F.; ROUSSEAU, J.: Strobe & Edge Correlator Multipath Mitigation for Code, Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the [JA1]-Satellite Division of the Institute of Navigation, ION – GPS 96, 17.–20. September 1996, Kansas City, Missouri, S. 657–664
- [23] GARIN, L.; ROUSSEAU, J.: Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier, Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION – GPS 97, 16.–19. September 1997, Kansas City, Missouri, S. 559–568
- [24] MCGRAW, G.A.; BRAASCH, M.S.: GNSS Multipath Mitigation Using Gated and High Resolution Correlator Concepts, Proceedings of the National Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION – NTM99, 25.–27. Januar 1999, San Diego, S. 333–342
- [25] TOWNSEND, B.; FENTON, P.: A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver, Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION-GPS 94, 20.–23. September 1994, Salt Lake City, Utah, S. 143–148

- [26] TOWNSEND, B. et al.: Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop, Navigation 42, No. 3, Fall 1995, S. 503 – 514
- [27] TOWNSEND, B. et al.: L1 Carrier Phase Multipath Error Reduction Using MEDLL Technology, Proceedings of the 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION – GPS 95, 12.–15. September 1995, Palm Springs, California, S. 1539 – 1544
- [28] VAN NEE, R. et al.: The Multipath Estimating Delay Lock Loop: Approaching Theoretical Accuracy Limits, Proceedings of the IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Las Vegas, Nevada, April 1994
- [29] VAN DIERENDONCK, A.J.; BRAASCH, M.S.: Evaluation of GNSS Receiver Correlation Processing Techniques for Multipath and Noise Mitigation, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 14.–16. Januar 1997, Santa Monica, California, S. 207–215
- [30] JAHN, A. et al.: Channel Characterization for Spread Spectrum Satellite Communications, Proceedings of the IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications (ISSSTA'96), 1996
- [31] LUTZ, E. et al.: Satellite Systems for Personal and Broadband Communications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000, ISBN 3-540-66840-3
- [32] PRATT, A. R. et al.: Tracking Complex Modulation Waveforms – How to avoid Receiver Bias, Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006 – 24.–27 April 2006, San Diego, California, USA.
- [33] EISSFELLER, B.; TIBERIUS, Ch.; PANY, Th.; BIBERGER, R.; HEINRICH, G.: Real-Time Kinematic in the Light of GPS Modernization and GALILEO, Proceedings ION GPS 2001, Salt Lake City.
- [34] TEUNISSEN, P.: An Optimality Property of the Integer Least-Squares Estimator, J. Geod., Vol. 73, S. 587–593
- [35] FORSELL, B.; MARTIN-NEIRA, M.; HARRIS, R.A.: Carrier Phase Ambiguity Resolution in GNSS-2; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, 16.–19. September 1997, S. 1727-1736
- [36] WERNER, W.; WINKEL, J.O.: TCAR and MCAR Options With GALILEO and GPS; Proceedings of GPS ION 2003, 9.–12. September 2003, Portland, Oregon, USA, S. 790–800

WWW-Links

European Union: www.europa.eu.int

European Space Agency: www.esa.int

GALILEO: www.galileo-pgm.org

GENESIS: www.genesis-office.org

GALILEO Joint Undertaking: www.galileoju.com

The White House: www.whitehouse.gov/news/releases

Anschrift der Verfasser:

BERND EISSFELLER, MARKUS IRSIGLER, JOSE-ANGEL AVILA-RODRIGUEZ, EVA SCHÜLER, TORBEN SCHÜLER

Institut für Erdmessung und Navigation

Universität der Bundeswehr München

D-85577 Neubiberg

bernd.eissfeller@unibw.de

Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt eine Übersicht über den momentanen Projektstatus des Satellitennavigationssystems GALILEO. Nach einer Beschreibung der GALILEO Architektur (Raumsegment, Bodensegment, Nutzersegment) folgt die Darstellung des Nutzersegmentes. In diesem Zusammenhang wird zunächst auf die aktuelle GALILEO Signalstruktur eingegangen, und es wird auf die als wahrscheinlich geltende Einführung von Modifikationen bzgl. der Modulation für GPS/GALILEO L_1 (E_1) durch MBOC-Signale eingegangen. Anschließend werden besondere technische Herausforderungen bei der Entwicklung von GALILEO Endgeräten besprochen. In Abschnitt 4 erfolgt dann die Diskussion wichtiger Performance-Kriterien, insbesondere des Rauschens der Code-Messungen, der Auswirkung von Mehrwege-Effekten und die Verbesserungen, die sich aus der kombinierten Nutzung von GALILEO und GPS ergeben können.