

Entwicklungsstand GALILEO mit einem Ausblick auf die Kombination mit GPS für die schnelle RTK-Positionierung*

Torben Schüler, Stefan Wallner und Bernd Eissfeller

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Übersicht über das im Aufbau befindliche europäische Satellitennavigationssystem GALILEO und sein Leistungspotential gegeben. Neben einer kurz gefassten Beschreibung der GALILEO-Systemarchitektur (Raumsegment, Bodensegment, Nutzersegment) wird im Nutzersegment auf die finale Signalstruktur eingegangen. Anschließend werden ausgewählte Leistungskriterien mit besonderem Fokus auf das Kode-Rauschen und Mehrwege-Fehler diskutiert. Die letzten beiden Abschnitte widmen sich der Kombination von GPS und GALILEO für die präzise RTK-Positionierung sowie Teilaspekten aus aktuellen Studien zur Zukunft dieses Satellitennavigationssystems (GNSS Evolution Programme) mit besonderem Augenmerk auf die Nutzung des C-Bands.

Summary

GALILEO is Europe's future Global Navigation Satellite System (GNSS). The current state of development as well as its potential performance is portrayed in this article. This comprises a brief description of the GALILEO system architecture (space, ground and user segments) including the final structure of the signal-in-space (SIS). Furthermore, selected performance criteria will be discussed with a special focus on code range noise as well as multipath error mitigation. Finally, the combination of GPS and GALILEO is discussed with respect to precise RTK positioning which requires quick ambiguity fixing, and aspects related to positioning using C-band measurements will be mentioned that could be realized in a future GALILEO-2 version (as investigated in a study of the GNSS Evolution Programme).

1 Einleitung

Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO wird gemeinsam von der Europäischen Union (EU) und der europäischen Weltraumorganisation ESA entwickelt. Weitere Staaten wie Indien, China, Israel, Ukraine, Südkorea usw. beteiligen sich ebenfalls am Aufbau von GALILEO (siehe Mitteilung der Europäischen Kommission – EC Commission → Transport → Galileo, 2008).

Die Realisierung von GALILEO erfolgt prinzipiell in drei Phasen, nämlich der Definition, Entwicklung und

Errichtung. Die Definitionsphase begann im Jahr 1999 mit der »Comparative System Study«, einer grundlegenden Systemstudie (siehe Alenia et al. 1999). Im Dezember 2003 wurde dann die Vorentwicklungsphase (GALILEO Phase C0) eingeleitet. Leider ist das GALILEO-Programm nicht frei von Rückschlägen, so dass der ursprüngliche (und bereits damals überaus ehrgeizige) Zeitplan, der eine volle operationelle Verfügbarkeit von GALILEO für das Jahr 2008 vorsah, nicht gehalten werden konnte. Unter der Annahme, dass keine weiteren einschneidenden Probleme zu Verzögerungen führen, erscheint das Erreichen einer vollen Betriebsbereitschaft um das Jahr 2014 realistisch. Nachfolgend werden die wesentlichen Vorkommnisse, die zu substanziellen Projektverzögerungen führten, aufgezählt:

1. Die politische Entscheidung (»grünes Licht«) für den Aufbau von GALILEO wurde für April 2001 erwartet, aber erst Ende März 2002 gefällt (Europäischer Ministerrat, siehe Pressemitteilung, Bundesministerium für Verkehr, 2002).
2. Streitigkeiten zwischen Deutschland und Italien über die industrielle Führung des Aufbaus von GALILEO, die ebenfalls erst durch den Verkehrsministerrat beigelegt wurden (inkl. Festlegung der finanziellen Anteile für die Einzelländer).
3. Erfolgreiche Verhandlungen mit dem potenziellen GALILEO-Konzessionär (der aus bestimmten GALILEO-Diensten Einnahmen erzielen und den Betrieb finanzieren sollte) nach einem bereits langwierigen Auswahlprozess. Dieser Rückschlag verursachte einen deutlichen Zeitverlust (Auswahlprozess lief seit Oktober 2003) und machte das Rahmenkonzept »PPP« (Public Private Partnership) weitgehend obsolet.
4. Technische Probleme bzgl. des Satelliten GIOVE-B, einem Kernelement für die In-Orbit-Validierungsphase. Der Start dieses Satelliten erfolgte erst Ende April 2008 – mit mehrjähriger Verspätung. Diese Verzögerungen führten im Jahre 2007 zu einer außerplanmäßigen Auftrags-Erteilung zur Konzeption eines weiteren GIOVE-A2 Satelliten an die Firma Surrey Ltd. mit dem Ziel einer Absicherung des GALILEO-Programmes (ESA News, 5. Mai 2007).

Zu den gegenwärtigen Entwicklungsschritten zählt neben der Entwicklungsphase die *Validierungsphase* (In Orbit Validation – IOV), die ca. vier Jahre dauern soll. Sie wird gefolgt von der Errichtungsphase, woran sich dann eine Betriebsphase von rund 20 Jahren anschließt.

* Überarbeitete Fassung des Vortrages beim 83. DVW-Seminar »GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen« am 18. und 19. März 2009 in Dresden. Die Seminarbeiträge sind als Band 57 in der Schriftenreihe des DVW erschienen und können beim Wißner-Verlag bestellt werden.

2 System, Konstellation und Signale

Die GALILEO-Systemsegmente werden in Tab. 1 beschrieben. Die wesentlichen Eigenschaften der GALILEO-Systemarchitektur lassen sich nach Weber et al. (2001) folgendermaßen zusammenfassen:

- Unabhängigkeit von anderen Systemen der Satellitennavigation,
- Interoperabilität mit GPS,
- Dienstkonzept (z.B. offen, sicherheitskritisch, reguliert),
- Implementierung eines Integritätsdienstes (in Europa/außerhalb Europas),
- Unabhängigkeit des Integritätsdienstes vom GALILEO-Kontrollsystem (GCS),
- Weltweite Dienste (Search & Rescue, 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).

Die wesentliche Erweiterung von GALILEO gegenüber GPS besteht in der Implementierung eines globalen Seg-

mentes zur Überwachung der Integrität. Zielsetzung ist die Unterstützung der sicherheitskritischen Navigation der Luftfahrt (Lande-anflug CAT I) sowie der Ortung und Führung von Zügen (Train Control) im Landverkehr. Der Leser sei bzgl. weiterer Details auf Eissfeller et al. (2007a) verwiesen.

2.1 Satellitenentwicklung

Im Rahmen der Entwicklungsphase waren zwei Experimentalsatelliten vorgesehen. Der erste GALILEO-Satellit – vom Unternehmen Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) gebaut – wurde auf den Namen GIOVE-A (GALILEO In Orbit Validation Element) getauft und am 28. Dezember 2005 an Bord einer Sojus-Trägerrakete vom Raumfahrtzentrum Baikonur ins Weltall transportiert. GIOVE-A besitzt eine Masse von 600 kg und eine Abmessung von $1,3 \times 1,3 \times 1,4 \text{ m}^3$, siehe Paffet (2006).

Diesem Satelliten sollte bereits Anfang 2006 ein zweiter (vom damaligen »GALILEO Industries« Konsortium gebauter) Satellit folgen: GIOVE-B. Er besitzt eine Masse von 523 kg, eine Primärleistung von 943 kW und Abmessungen von $0,955 \times 0,955 \times 2,4 \text{ m}^3$. Der Start dieses Satelliten verzögerte sich auf den 26. April 2008.

Die Hauptaufgaben von GIOVE-A/B bestehen in der Sicherung der von der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) zugewiesenen Frequenzen sowie in der Lieferung der für die Konstellation der GALILEO-Satelliten erforderlichen Messwerte und der Erprobung der kritischen Technologien (Atomuhren, Bordinstrumente, Signalgeber und Empfänger). Für GIOVE-A wurde ein spezielles Bodensegment eingerichtet, das eine experimentelle Präzisionszeitgeberstation beinhaltet und neben einem weltweiten Netz von Sensorstationen für die Erfassung der GALILEO-Daten ein Rechenzentrum im Europäischen Raumforschung- und Technologiezentrum der ESA in den Niederlanden umfasst, siehe Pressemitteilung der Europäischen Kommission (2005).

Tab. 1: Segmente des GALILEO-Systems

Segment	Beschreibung
Raumsegment siehe Benedicto et al. (2000)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Walker 27/3/1 Konstellation ■ 30 MEO Satelliten (Medium Earth Orbit; 27 plus 3 nicht-aktive Ersatzsatelliten) ■ Verteilung der Satelliten auf 3 Bahnebenen ■ Bahnhöhe bei 23.260 km (große Halbachse: 29.601,3 km) ■ Neigung der Bahnebene: 56° <p><i>(Hinweis: Die gemachten Angaben entsprechen der aktuell bekannten Richtlinie, wie sie im offiziellen Dokument »European Global Navigation Satellite Systems: High Level Requirements Document (HLD) – issue 4« spezifiziert werden; dieses Dokument ist offiziell noch nicht zur Publikation freigegeben.)</i></p>
Bodensegment siehe Weber et al. (2001)	<ul style="list-style-type: none"> ■ GCS (Ground Control Segment; Kontrollsegment für Betrieb sowie Bahn- und Zeitbestimmung) bestehend aus 30 bis 40 Sensorstationen, 9 Up-Link Stationen, 5 TTC-Stationen sowie 3 Kontrollzentren (2 während der In-Orbit Validation – IOV) ■ IDS (Integrity Determination System; System zur Überwachung der Integrität)
Nutzersegment	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alle Anwender zu Wasser, auf dem Land, in der Luft und im Welt- raum ■ Anforderungen an GALILEO-Leistungsparameter orientieren sich am (a) <i>Massenmarkt</i> und (b) <i>sicherheitskritischen Anwendungen</i> (= Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit/Integrität des Systems; Anforderungen entsprechen den Luftfahrtanforderungen für den präzisen Landeanflug – CAT I)

2.2 Signale und Dienste

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, siehe US-EC (2004) und GALILEO (2004a,b). Diese »Kompatibilitäts- und Interoperabilitäts-Verhandlungen« konnten im Juni 2004 erfolgreich abgeschlossen werden. Das Dienstkonzept ist in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Für GALILEO vorgesehene Dienstkonzept

Bezeichnung	Anmerkungen
Offener Dienst (Open Service)	OS <ul style="list-style-type: none"> ■ Auf E1 und E5 (inkl. E5a und E5b) frei und kostenlos empfangbar ■ Für Massenmarkt-Anwendungen vorgesehen, aber geodätisch ohne Probleme nutzbar
Kommerzieller Dienst (Commercial Service)	CS <ul style="list-style-type: none"> ■ Kostenpflichtig und verschlüsselt ■ Hohe Datenrate (geplant: 1000 Symbole/sec) ■ Ursprünglich insbesondere zur Erzielung von Einnahmen für den Konzessionär vorgesehen; nach Scheitern entsprechender Verhandlungen ist Ausgestaltung dieses Dienstes wieder offen
Sicherer Dienst (Safety of Life)	SoL <ul style="list-style-type: none"> ■ Gegenüber OS um Integritätsmechanismen erweitert (rechtzeitige Warnungen bei Genauigkeitsproblemen und Satelliten-Ausfall) ■ Für Transportwesen (insbes. Luftfahrt) vorgesehen
Regulierter Dienst (Public Regulated Service)	PRS <ul style="list-style-type: none"> ■ Ausschließlich hoheitlichen und anderen staatlichen Kreisen vorbehalten (Polizei, Küstenwache, ggf. auch Feuerwehr u. ä.) ■ Robustes, verschlüsseltes Signal (ähnlich wie die militärischen Signale bei GPS)

Der endgültige Stand der GALILEO-Signaldefinition ist in Abb. 1 und Tab. 3 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass eine Vielzahl von Signalmodulationen bzw. entsprechende Varianten Verwendung finden. So ist das Binary Phase Shift Keying (BPSK) das von GPS bereits bekannte Modulationsverfahren, das als das Produkt eines unmodulierten Trägers mit einem aus rechteckigen Impulsen bestehenden Spreizungskanal verstanden werden kann. Die Länge eines jeden Impulses ist durch $1/f_c$ gegeben, wobei f_c die Chiprate darstellt. Zur besseren spektralen Entkopplung als auch zur besseren Leistungsfähigkeit in Bezug auf Mehrwege-Fehler und Phasenrauschen wurde die sogenannte Binary Offset Carrier (BOC) Modulation eingeführt, siehe auch Betz et al. (2000). Hierbei wird zusätzlich zum Träger und zum Spreizungskanal eine Signalkomponente, bestehend aus einem binären Unterträger, eingefügt. Dieser binäre Unterträger wird mit einer Frequenz f_s erzeugt, die ein Vielfaches der Chiprate f_c ist. Nähere Informationen bezüglich der BPSK- als auch der BOC-Modulation finden sich in Avila-Rodriguez (2008, Abschnitt 4.3). Die AltBOC-Modulation erlaubt

das Multiplexing von zwei bzw. vier Navigationssignalkomponenten auf nahe zusammenliegenden Frequenzen unter Wahrung der konstanten Amplitude, siehe hierzu auch Lestarquit et al. (2008).

GALILEO wird Signale in drei Frequenzbändern abstrahlen, und zwar im unteren L-Band E5a (Zentralfrequenz ist identisch mit GPS L5) und E5b mit jeweils 24 MHz Bandbreite bzw. der gesamte E5a/b-Bereich mit einer Bandbreite von etwa 51 MHz, im mittleren L-Band E6 mit insgesamt 40 MHz Bandbreite sowie im oberen

L-Band E1 (ebenfalls identisch mit GPS L1) mit 32 MHz Bandbreite, siehe auch Eissfeller et al. (2007a). Hierbei ist anzumerken, dass Ende 2006 von offizieller Seite die Terminologie von »GALILEO L1« zu Gunsten der Bezeichnung »GALILEO E1« abgelöst wurde.

Im März 2006 wurde von einer EU/US-Arbeitsgruppe für die künftigen frei verfügbaren Dienste von GALILEO und GPS im E1/L1-Band die Signalmodulation MBOC(6,1,1/11) vorgeschlagen. Trotz unterschiedlicher Implementationsformen, CBOC(6,1,1/11) für GALILEO E1 OS und TBOC(6,1,1/11) für GPS L1C, ist die Inter-

operabilität zwischen den zukünftigen Open-Service-Diensten der beiden Systeme gegeben. Details findet der Leser in Avila-Rodriguez et al. (2007). CBOC kann als die lineare Überlagerung einer BOC(1,1)-Modulation mit einer BOC(6,1)-Modulation angesehen werden. Somit wird die Kompatibilität mit der ursprünglich für Galileo angedachten Modulationsform BOC(1,1) deutlich. Die durch den BOC(6,1)-Anteil eingefügten höheren Frequenzanteile helfen bei der Unterdrückung von Mehrwege-Fehlern, was auch für geodätische Nutzergruppen von hoher Bedeutung sein dürfte (siehe hierzu auch Abschnitt 3.1.2 sowie Abb. 2).

Alle weiteren Details bezüglich der Dienste, Chip- und Datenraten sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Mit E5 liegt ein besonders breitbandig abgestrahltes Signal unter Nutzung der erwähnten AltBOC-Modulation vor, was einen geringeren Mehrwege-Fehler zur Folge hat. Zukünftige Empfänger werden entweder die einzelnen Signalkomponenten E5a oder E5b tracken können, hochwertige (teure) Empfänger aber auch das gesamte, breitbandige E5-Signal. Nur dieses profitiert von den genannten positiven Eigenschaften, da die Signalkomponenten E5a/b intern aus Kompatibilitätsgründen zu GPS

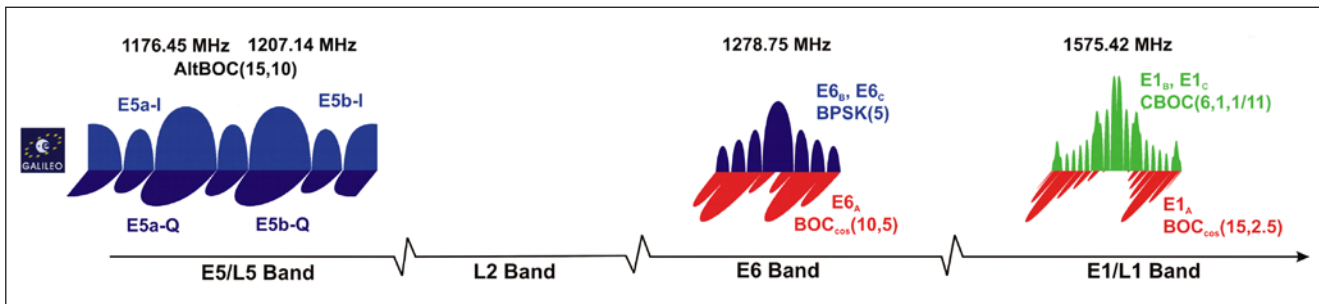


Abb. 1: Schematische Darstellung der Signaldefinition von GALILEO; zur Farbgebung: hellblau = E5 (I-Kanal) OS, dunkelblau = E5 (Pilotkanal) OS sowie E6 (I-Kanal) CS, rot = PRS (Pilotkanäle), grün = E1 OS (Anmerkung: Pilotkanäle Q sind datenfrei).

Tab. 3: Frequenzen und Modulation der GALILEO-Signale;

OS: Open Service – SoL: Safety of Life – CS: Commercial Service (Realisierung gegenwärtig unklar) – PRS: Public Regulated Service – Mcps: Megachips per second – sps: symbols per second – Angaben zur abgestrahlten Bandbreite entsprechen den formell bei der International Telecommunication Union (ITU) beantragten Werten.

Signal	Frequenz [MHz]	abgestrahlte Bandbreite [MHz]	Dienst(e)	Modulation	Chiprate [Mcps]	Datenrate [sps]
E5a	1176,45	24	OS	BPSK(10)	10,23	50
E5b	1207,14	24	OS SoL			250
E5	1191,80	51	OS	AltBOC(15,10)		–
E6 _A	1278,75	40	CS	BPSK(5)	5,115	1000
E6 _{B,C}	1278,75		PRS	BOC _{cos} (10,5)	5,115	–
E1 _{B,C}	1575,42	32	OS SoL CS	CBOC(6,1,1/11)	1,023	250
E1 _A	1575,42		PRS	BOC _{cos} (15,2,5)	2,5575	–

per BPSK(10) moduliert werden (dies wird nachfolgend in Tab. 5 berücksichtigt).

Für alle zivilen Signale ist eine datenfreie und eine datenbehaftete Signalkomponente vorgesehen; dies wird durch den I-Kanal und den um 90° gedrehten Q-Kanal – Pilotkanal – auf E5a/b bzw. durch Interplexmodulation bei E1_{B,C} und E6_{B,C} realisiert. Das datenfreie Signal bietet sich für ein robusteres Tracken der Trägerphasen an, da der Schwellwert für das Auftreten von Phasensprüngen um insgesamt ca. 7 dB höher liegt.

3 Präzise Positionierung mit GALILEO

3.1 Genauigkeit der Kode-Strecken

Bei der schnellen präzisen Positionierung ist die Genauigkeit der Streckenmessung von großer Bedeutung. Die Mehrdeutigkeitsbestimmung allein aus Trägerphasen dauert lange, da die Satellitenkonstellation sich nur langsam

verändert, was aber für die Dekorrelation der Mehrdeutigkeitsparameter erforderlich wäre. Die Streckenmessung ist hingegen frei von Mehrdeutigkeiten und wird deshalb häufig parallel zu den Trägerphasen für eine schnelle präzise Positionierung verwendet. Daher wird im Folgenden auf die Performance von Kode-Messungen sowohl für GALILEO als auch für GPS etwas näher eingegangen.

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. 4 stellt das Kode-Rauschen für die gegenwärtigen und zukünftigen GPS- und GALILEO-Signale gegenüber. Es ist zu beachten, dass hierbei nur das Empfänger-Rauschen dargestellt wird. Alle anderen externen Effekte (z.B. die atmosphärische Refraktion) bleiben unberücksichtigt. Bei den gewählten C/N₀-Verhältnissen handelt es sich eher um optimale Bedingungen, Beobachtungen bei einer niedrigen Elevation weisen ein entsprechend höheres Rauschen auf.

Tab. 4: Rauschen der Kode-Strecken für GPS- und GALILEO-Empfänger bei einheitlichem bzw. individuellem Träger-zu-Rauschverhältnis (C/N_0), B = Empfänger-Bandbreite; aus Eissfeller et al. (2007a).

Signal	Modulation	Leistung [dB · W]	B [MHz]	C/N_0 [dB · Hz]	Rauschen [m]		
GPS L1 C/A	BPSK(1)	-160	24	45	41,5	0,24	0,36
GPS L1 C/A	BPSK(1)	-160	8	45	41,5	0,41	0,61
GALILEO E1 _{B,C}	BOC(1;1)	-155	24	45	46,5	0,14	0,11
GALILEO E1 _{B,C}	BOC(1;1)	-155	8	45	46,5	0,23	0,19
GALILEO E1 _{B,C}	CBOC(6,1,1/11)	-155	24	45	46,5	0,10	0,08
GALILEO E6 _{B,C}	BPSK(5)	-155	24	45	46,5	0,11	0,09
GPS L5	BPSK(10)	-154	24	45	47,5	0,08	0,06
GALILEO E5	AltBOC(15;10)	-155	51	45	46,5	0,02	0,02

Es wird deutlich, dass die GALILEO-Messungen ein geringeres Rauschniveau aufweisen werden als vergleichbare GPS-Signale. Die geringsten Werte für GPS werden bei L5 erreicht, von GALILEO E5 aber nochmals unterboten.

Die deutliche Verringerung des Rauschniveaus wird gewiss ihre Auswirkung auf präzise Anwendungen haben, allerdings werden sich Mehrwege-Effekte weiterhin störend bemerkbar machen und die Genauigkeit der Streckenmessungen herabsetzen.

3.1.2 Mehrwege-Fehler

Der Einfluss der Mehrwege-Signale ist hauptsächlich abhängig von der Modulationsart, der Bandbreite des empfangenen Signals sowie den Eigenschaften der Empfangsumgebung (Anzahl und Dämpfung der auftretenden Umwegsignale, Entfernung der potenziellen Reflektoren von der Antenne). Hochwertige geodätische Empfänger reduzieren diese Fehlereinflüsse durch Anwendung ent-

sprechender Signalverarbeitungsalgorithmen, z. B. durch die »enge« Korrelation. Diese Verfahren werden von Irsigler (2008) diskutiert.

Die maximalen und durchschnittlich zu erwartenden Mehrwege-Fehler sind in Tab. 5 zusammengefasst. Hierbei wurden verschiedene typische Mehrwege-Umgebungen (offen, städtisch usw.) berücksichtigt. Die zugrunde liegenden Kanalmodelle werden von Irsigler (2008)

genannt – auf sie sei auch ausdrücklich bzgl. einer genauen Definition der Umgebung verwiesen, da die Vorstellungen des Lesers bzgl. der Gebietsklassifikationen (offen=open, städtisch=urban und insbes. ländlich=rural sowie vorstädtisch=suburban) möglicherweise von denen der Modellierer abweichen können.

Mehrwege-Fehler sind sowohl bei GPS als auch bei GALILEO gewöhnlich weitaus größer als das Empfänger-Rauschen, wobei GALILEO grundsätzlich ein etwas günstigeres Verhalten aufweist. Die dargestellten Werte für GPS L1 (BPSK) bzw. GALILEO E1 (BOC) unterscheiden sich bei identischer Filterbandbreite allerdings nicht voneinander, da die Einhüllende (Maximalfehler) bei Mehrwegen bis ca. 100m für beide Modulationen identisch ist und erst bei größeren Mehrwegen (in der geodätischen Praxis nur selten relevant und in den Kanalmodellen für die dargestellte Umgebung entsprechend nicht berücksichtigt) die Vorteile der BOC-Modulation ausgespielt werden können. Die geringsten Mehrwege-Fehler sind bei der Verwendung des GALILEO E5-Signals zu erwarten.

Tab. 5: Maximale (Einhüllende) und repräsentative mittlere Mehrwege-Fehler für GPS und GALILEO Kode-Beobachtungen bei Verwendung »enger« Korrelation zur Mehrweg-Reduktion; modifiziert in Anlehnung an Eissfeller et al. (2007a).

Signal	Modulation	Bandbreite [MHz]	Max. Fehler [m]	Repräsentative Mittelwerte [m]			
				offenes Gelände	ländliche Gebiete	vorstädtisch	städtisch
GPS L1 C/A	BPSK(1)	8	12,0	0,24	2,04	0,87	4,85
GALILEO E1 _{B,C}	BOC(1,1)						
GPS L1 C/A	BPSK(1)	24	6,9	0,20	1,39	0,59	3,35
GALILEO E1 _{B,C}	BOC(1,1)						
GALILEO E1 _{B,C}	CBOC(6,1,1/11)	24	5,2	0,17	0,85	0,36	2,04
GALILEO E6 _{B,C}	BPSK(5)	24	4,00	0,14	0,80	0,34	1,97
GPS L5	BPSK(10)	24	4,51	0,15	0,54	0,23	1,42
GALILEO E5a/E5b							
GALILEO E5	AltBOC(15,10)	51	1,62	0,04	0,11	0,05	0,30

Die von GIOVE-B ausgestrahlten Signale erlauben bis zu einem gewissen Grad die Überprüfung dieser Simulationsergebnisse. Abb. 2 ist Simsky et al. (2008) entnommen und stellt tatsächlich gemessene Mehrwege-Fehler an einer Referenzstation in Leuven (Belgien) dar. Es ist schwierig, eines der vier in Tab. 3 dargestellten Umgebungsmodelle direkt auf diese Situation anzuwenden, jedoch darf in diesem Fall von einer Mehrwege-be-

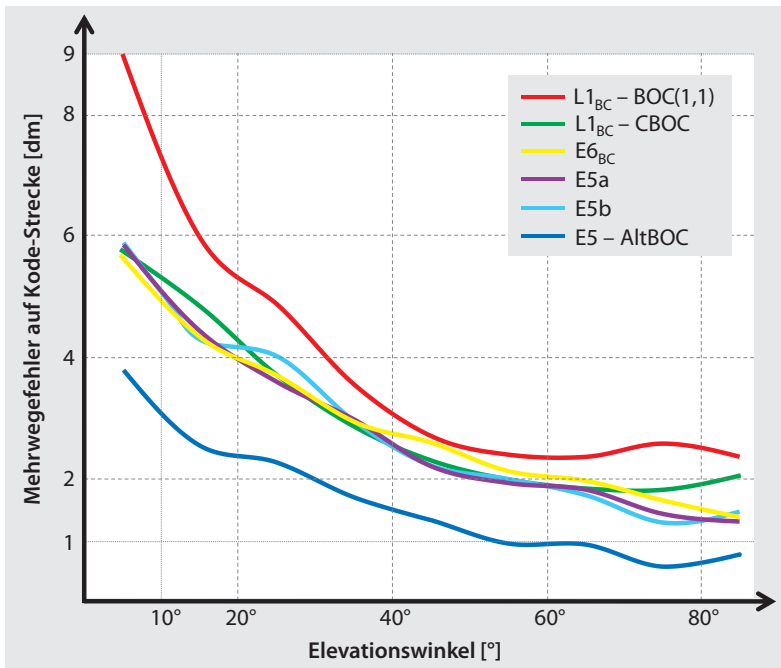


Abb. 2: Ermittelte Mehrwege-Fehler aus GIOVE-B-Daten gemäß Simsky et al. (2008)

hafteten Umgebung ausgegangen werden, die ungefähr dem Typ »Rural« (dieses Kanalmodell enthält Bebauung) entspricht.

Zunächst werden die Vorteile der MBOC (CBOC)-Modulation (E1) im Vergleich zu BOC(1,1) deutlich. Die bestmögliche Mehrwege-Mitigation wird erwartungsgemäß mit E5 erzielt. Dieses Signal hebt sich deutlich von den restlichen ab. Bei einer Elevation von 15° muss mit Fehlern von etwas mehr als 2 dm gerechnet werden. Die 1 dm-Schwelle wird bei etwas mehr als 50° erreicht.

3.2 Kombination von GPS und GALILEO

Ein wesentlicher Vorteil für die präzise GNSS-Positionierung wird sich aus der kombinierten Nutzung von GPS- und GALILEO-Signalen ergeben. Neben verbesserten Signalen kann dann die deutlich verbesserte Geometrie auf Grund der gemeinsamen Nutzung zweier globaler Satellitenkonstellationen ausgenutzt werden. Ferner wurde bereits deutlich, dass die Integration der beiden Systeme in einem Empfänger vergleichsweise einfach sein wird, denn GPS L1/L5 und GALILEO E1/E5a liegen auf iden-

tischen Zentralfrequenzen. Auch die Datenverarbeitung wird auf Grund einheitlicher Verwendung der CDMA-Technik (Code Division Multiple Access) – im Gegensatz zum FDMA (Frequency Division Multiple Access) bei GLONASS – nur geringe Modifikationen verlangen.

3.2.1 RTK-Positionierung im L-Band

Im Rahmen einer Studie wurde untersucht, inwieweit sich die kombinierte Nutzung von GPS und GALILEO unter Nutzung eines aktiven Referenznetzwerkes wie SAPOS positiv auswirkt – oder anders ausgedrückt: inwieweit das bestehende Netz ausgedünnt werden könnte, ohne dass merkliche Einschnitte in den Leistungsparametern zu verzeichnen wären. Auf diese Weise könnten signifikante Infrastrukturkosten (inkl. Betriebskosten) eingespart werden. Für weitergehende Details sei auf den zusammenfassenden Artikel von Schüler, E. et al. (2007) sowie die Dissertation Schüler, E. (2008) verwiesen.

Exemplarisch seien hier Ergebnisse für die Positionierung in einer stark ausgedünnten Dreiecksmasche des SAPOS-Subnetzes dargestellt mit einer Entfernung zum »Rover« von knapp 200 km (siehe Abb. 3). Im gegenwärtigen Netzausbau finden wir bspw. in Thüringen typische Entfernungen zwischen SAPOS-Stationen von ca. 30 bis 60 km. Intentionell wurde jedoch diese drastische Ausdünnungs-Stufe hier gewählt, um be-

stimmte Charakteristika bei der Kombination von GPS und GALILEO herausarbeiten zu können.

Die Ergebnisse bzgl. der Mehrdeutigkeitsfixierung wurden in Abb. 4 dargestellt, wobei eine Beschränkung auf das »Szenario M VI« erfolgte, das sich durch eine vergleichsweise starke Ionosphärenaktivität auszeichnet: Die simulierten Daten berücksichtigen mittelskalige wandernde Ionosphärenstörungen mit einer Amplitude bis 3,7 TECU bei einer Periodizität von 45 Minuten und einer Reisegeschwindigkeit von 180 km/h (zusätzlich werden an-/absteigende Flanken von 2,0 m über 25 Minuten angebracht). Die Fixierung der Mehrdeutigkeiten wurde in den einzelnen Positionierungsexperimenten nach jeweils 40 Sekunden erzwungen. Diese Zeitspanne entspricht dem typischen Intervall, innerhalb dessen die Mehrzahl (knapp 60%) der Nutzer des (gegenwärtigen) bayerischen SAPOS-Teilnetzes eine Fixierung erhält (eine Stichprobe von drei Tagen wurde hierzu ausgewertet).

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Positionierung mit GPS alleine unter Nutzung von L1+L2 zu einer Fixierungsrate von nur wenig mehr als 40% führt, d.h. eine Reihe von Nutzern dürfte in diesem Szenario mit den Ergebnissen unzufrieden sein. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Nutzung von drei Frequenzen bei GPS allein keine dramatische Leistungssteigerung bewirkt, wenn-

gleich die Zahl der erfolgreichen Experimente immerhin um knapp 10% ansteigt. Beschränkt man sich hingegen auf einen zukünftigen kombinierten GPS+GALILEO 2-Frequenz-Empfänger (L1/L5 + E1/E5a), so verbessert sich die Statistik deutlich auf fast 80%. Ein kombinierter GPS+GALILEO-Empfänger mit drei Frequenzen verbessert die Situation wiederum nur ein wenig, hebt die Rate aber auf 90% an. Der Maximalwert von fast 93%

wird unter Hinzunahme des E6-Signals erzielt (für den kommerziellen Dienst vorgesehen, d.h. kostenpflichtig; Zukunft ungeklärt).

Dieses Beispiel illustriert recht eindrucksvoll den Vorteil einer gemeinsamen Nutzung von GPS und GALILEO. Auch ein kombinierter 2-Frequenz-Empfänger wird die Vorteile der doppelten GNSS-Geometrie ausschöpfen können. Tatsächlich zeigte sich bei weniger stark ausgedünnten Netzwerkmassen, dass die Vorteile eines kombinierten 3-Frequenz-Empfängers dort noch schwächer gegenüber einem – vermutlich deutlich preisgünstigeren – 2-Frequenz-Empfänger ausgeprägt sind als in dem hier dargestellten Beispiel.

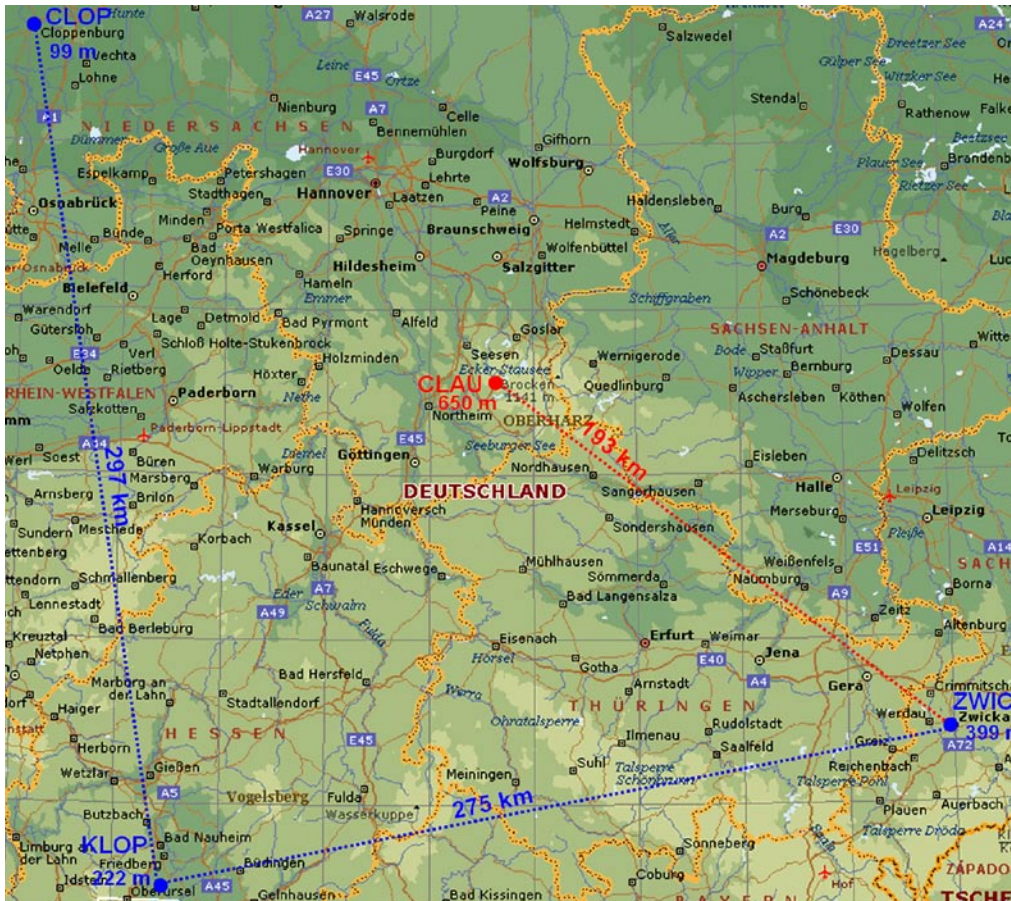


Abb. 3: Netzwerkkonfiguration für Rover-Positionierungen bis zu einer Basislinienlänge von ca. 200 km (Kartengrundlage: MS Encarta Weltatlas 2001)

3.2.2 Nutzung der C-Bands

Obwohl GALILEO noch längst nicht Realität ist, werden bereits im Rahmen des »GNSS Evolution Programme« der ESA Studien über Verbesserungen in zukünftigen Navigationsatelliten (»GALILEO-2«) durchgeführt. Dabei steht auf Grund der Vielzahl der sich im L-Band konzentrierenden Dienste nunmehr die Erschließung neuer Frequenzbänder für die Navigation im Vordergrund. Ähnliche Untersuchungen wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wurden daher auch unter Einschluss des C-Bandes (Kombination mit E1 oder E1+E5a) durchgeführt. Der wesentliche Vorteil von C-Band-Messungen liegt in den – im Vergleich zu L1/E1 – rund zehnfach niedrigeren ionosphärischen Restfehlern. Wei-

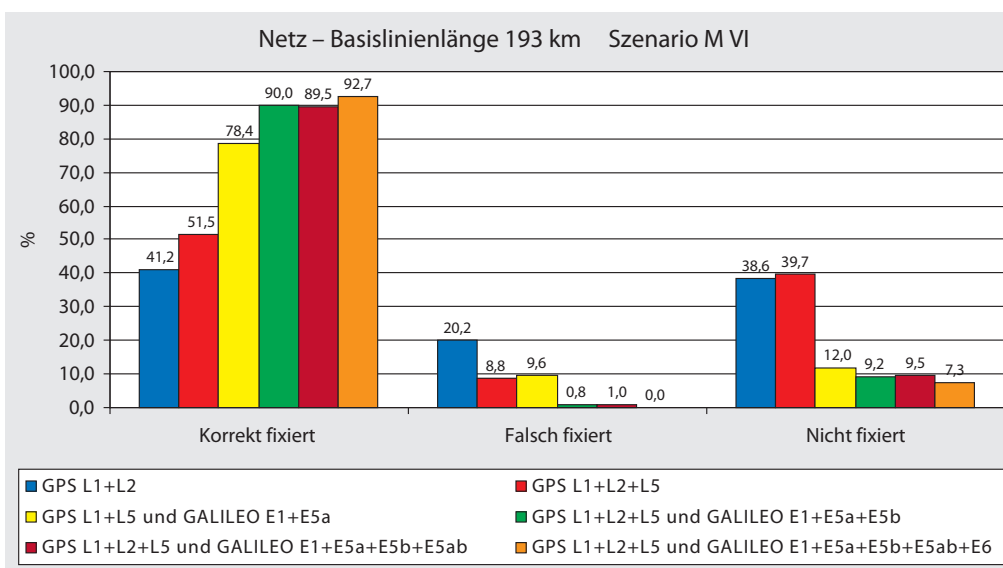


Abb. 4: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig/ falsch/ nicht fixierbar)

terführende Informationen zur Nutzung des C-Bands für GALILEO finden sich in Schmitz-Peiffer et al. (2008).

Die Verwendung des C-Bands bei einer Zentralfrequenz von 5,019 GHz ist auf Grund der geringen Wellen-

länge von weniger als 6cm nicht unproblematisch. Der Vorteil geringer Ionosphärenfehler kommt auch nur partiell zum Tragen, da für die RTK-Positionierung mit ihren Anforderungen an die schnelle Mehrdeutigkeitsfixierung

im Allgemeinen mit Signalen auf mehreren Frequenzen (also unter Einschluss von L-Band-Signalen) gearbeitet werden muss. Dennoch zeigt sich gemäß Abb. 5, dass bei der Verwendung zeitgemäßer Verfahren zur Mehrdeutigkeitsfixierung der Einschluss von C-Band-Signalen möglich ist. In diesem Szenario wurden die SAPOS-Stationen ALFE, FULD, PLAU als Referenzstationen verwendet (Dreiecksmasche zur Ableitung von Flächenkorrekturen mit Basislinien von 160 und 174km) und die Station ERFU als Rover mit knapp 100km Entfernung zur nächsten Referenzstation verwendet (gleiche Ionosphärenaktivität wie im vorhergehenden Abschnitt).

In immerhin mehr als 96% der Positionierungsexperimente wird eine korrekte Fixierung der Mehrdeutigkeiten erzielt, allerdings nur bei zusätzlicher Benutzung von zwei L-Band-Signalen. In einem Zweifrequenz-Fall (Kombination von L- und C-Band) sinkt die Erfolgsstatistik auf weniger als 65%. Grundsätzlich kann jedoch festgestellt werden, dass die Verwendung des C-Bandes für die RTK-Positionierung in einem Multi-Carrier-Empfänger möglich wäre.

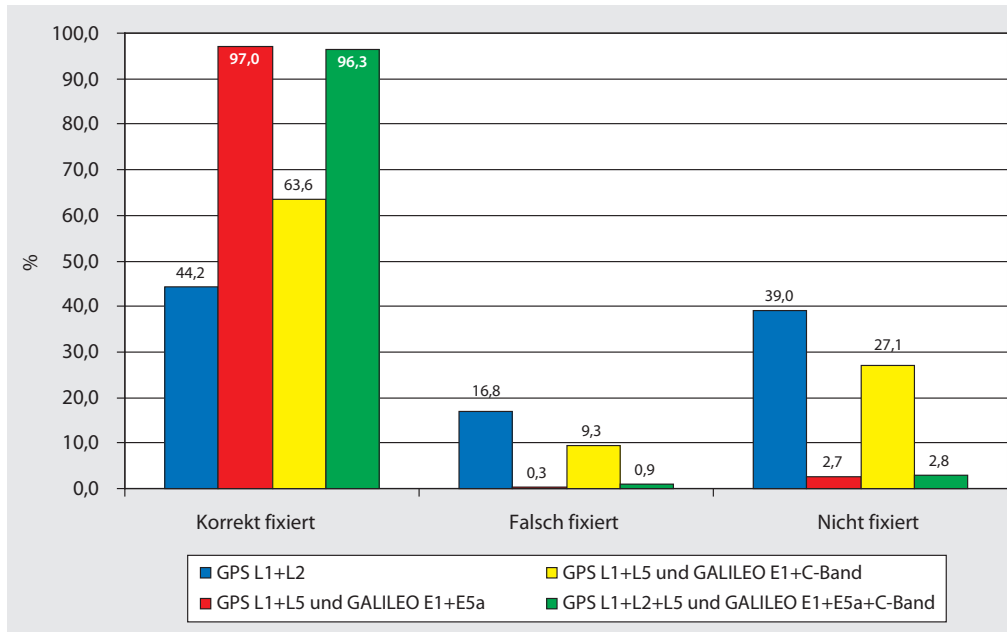


Abb. 5: Mehrdeutigkeitsfixierung [%] (richtig/ falsch/ nicht fixierbar) unter Nutzung simulierter C-Band-Daten.



Abb. 6: Netzwerkkonfiguration für die Rover-Positionierung unter Nutzung simulierter C-Band-Daten

4 Abschließende Bemerkungen

Die Entwicklung des weltraumbasierten Navigationssystems GALILEO stellt eine große technologische und finanzielle Herausforderung für Europa dar. Auf der anderen Seite ist jedoch eine deutliche Steigerung der Leistungsparameter der Satellitennavigation für fast alle Anwender zu erwarten. Erste über GIOVE-B ermittelte Messergebnisse stimmen optimistisch und betonen den innovativen Charakter des breitbandigen E5-Signales. Die aus einer kombinierten Nutzung von GPS und GALILEO erwachsenden Vorteile für geodätische Nutzer wurden entsprechend am Beispiel der schnellen präzisen Positionierung herausgearbeitet.

Literatur/Quellennachweise

- Alenia, Alcatel, Dornier Satellitensysteme, Matra Marconi Space (*Vortrag*): GNSS-2 Comparative System Study, Final Presentation, Noordwijk, 7. Dezember 1999.
- Avila-Rodriguez, J. A.; Hein, G. W.; Wallner, St.; Issler, J.-L.; Ries, L.; Lestarquit, L.; de Latour, A.; Gode, J.; Bastide, F.; Pratt, T.; Owen, J.: The MBOC Modulation – A Final Touch for the Galileo Frequency and Signal Plan, InsideGNSS, S. 43–58, Gibbons Media and Research, www.insidegnss.com, September/Okttober 2007.
- Avila-Rodriguez, J. A.: On Generalized Signal Waveforms for Satellite Navigation; Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, <http://forschung.unibw.de/ainfo.php?&id=12222>, 15. Dezember 2008.
- Betz, J. W. et al.: Overview of the GPS M Code Signal, www.mitre.org/work/tech_papers/tech_papers_00/betz_overview/betz_overview.pdf, Mai 2000.
- Benedicto, J.; Dinwiddy, S. E.; Gatti, G.; Lucas, R.; Lugert, M.: GALILEO Satellite Design and Technology Developments; European Space Agency, Noordwijk, http://esamultimedia.esa.int/docs/galileo_world_paper_Dec_2000.pdf, November 2000.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Deutschland unterstützt die Entwicklung der europäischen Satellitennavigation, Pressemitteilung, Nr.: 054/02, Berlin, 27. Februar 2002.
- EC Commission > Transport > Galileo: International cooperation, http://ec.europa.eu/transport/galileo/international_cooperation_en.htm, 2008 – letzte Aufdatierung am 2. September 2009.
- Eissfeller, B.; Isrigler, M.; Avila-Rodriguez, J.-A.; Schüler, E.; Schüler, T.: Das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO – Entwicklungsstand; Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, 2/2007, S. 42–55, Wißner-Verlag, Augsburg, Februar 2007.
- Eissfeller, B.; Deisting, B.: Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO, Mitteilungen DVW Bayern e.V., Heft 3 – 3. Quartal 2006.
- Eissfeller, B.; Ameres, G.; Kropp, V.; Sanroma, D.: Performance of GPS, GLONASS and Galileo; Beitrag zur 51. Photogrammetrischen Woche, Stuttgart; www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo07/220Eissfeller.pdf, 3.–7. September 2007.
- ESA News: GIOVE-A2 to secure the Galileo programme, www.esa.int/esaNA/SEM8LNN0LYE_index_0.html, 5. März 2007.
- Europäische Kommission, Generaldirektion Energie und Verkehr: GALILEO auf Kurs – GIOVE-A-Satellit im Orbit, Pressemitteilung, IP/05/1712, Brüssel, 28. Dezember 2005.
- GALILEO: GALILEO Signal Baseline; Standardisation Document of Navigation Systems Panel (NSP), St. Petersburg, Russland, www.galileoju.com/doc/Navigation%20System%20Panel%20NSP%20Galileo%20Signal%20Baseline.pdf, 25. Mai – 4. Juni 2004.
- GALILEO: GALILEO Signals: RF Characteristics ; Standardisation Document of Navigation Systems Panel (NSP), Montreal, Kanada, www.galileoju.com/doc/Navigation%20System%20Panel%20NSP%20Galileo%20Signals%20RF%20Characteristics.pdf, 12.–22. Oktober 2004.

- Hein, G. W., Avila-Rodriguez, J.-A.; Wallner, S.; Betz, J. W.; Hegarty, C. J.; Rushanan, J. J.; Kraay, A. L.; Pratt, A. R.; Lenahan, S.; Owen, J.; Issler, J.-L.; Stansell, T. A.: MBOC: The New Optimized Spreading Modulation – Recommended for Galileo L1 OS and GPS L1C; Inside GNSS – Engineering Solutions for the Global Navigation Satellite System Community, Vol. 1, No. 4, S. 57–65, Gibbons Media & Research, <http://forschung.unibw.de/papers/rhxcd476ayowndss79v733q9ijhrqg.pdf>, Mai/Juni 2006.
- Isrigler, M.: Multipath Propagation, Mitigation and Monitoring in the Light of Galileo and the Modernized GPS; Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, <http://forschung.unibw.de/ainfo.php?&id=12147>, 31. August 2008.
- Lestarquit, L., Araud, G., Issler, J.L.: AltBOC for Dummies or Everything You Always Wanted to Know About AltBOC, Proceedings of ION-GNSS 2008, Savannah, GA, USA, <https://engineering.purdue.edu/AAE/Academics/Courses/aae575/2009/papers/altboc4d>, September 2008.
- Paffet, J. (*Vortrag*): GIOVE-A – The First GALILEO Satellite In Space, Munich Satellite Navigation Summit 2006, 21.–23. Februar 2006.
- Schüler, E.; Schüler, T.: Active GNSS Networks and the Benefits of Combined GPS+Galileo Positioning, Inside GNSS, S. 46–55, Gibbons Media & Research, <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=11671> oder www.insidegnss.com, Nov./Dez. 2007.
- Schüler, E.: Schnelle Präzise Positionierung mit GPS und GALILEO unter Nutzung aktiver Referenznetzwerke; Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Neubiberg, <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=12213>, 17. November 2008.
- Schmitz-Peiffer, A.; Stopfkuchen, L.; Floch, J.-J.; Fernandez, A.; Jorgensen, R.; Eissfeller, B.; Rodriguez, J. A.; Wallner, St.; Won, J.-H.; Anghileri, M.; Lankl, B.; Schüler, T.; Balbach, O.; Colzi, E.: Architecture for a Future C-band/L-band GNSS Mission – Part 1: C-band Service, Space- and Ground Segment, Overall Performance; InsideGNSS, Gibbons Media and Research, S. 47–56, www.insidegnss.com/node/1457, Mai/Juni 2009.
- Simsy, A.; Mertens, D.; Sleewaegen, J.-M.; de Wilde, W.; Hollreiser, M.; Crisci, M.: Multipath and Tracking Performance of Galileo Ranging Signals Transmitted by GIOVE-B; Proceedings of ION GNSS 2008, 21st International Technical Meeting of the Satellite Division, Savannah, USA, 16.–19. September 2008.
- US-EC: Agreement on the Promotion, Provision and Use of GALILEO and GPS Satellite-based Navigation Systems and Related Applications, <http://pnt.gov/public/docs/2004-US-EC-agreement.pdf>, 2004.
- US-EU: WGA Signed Recommendation on MBOC, www.galileoju.com/doc/Navigation%20System%20Panel%20NSP%20Galileo%20Signals%20RF%20Characteristics.pdf, 23. März 2006.
- US-POLICY: U.S. Space-Based Positioning, Navigation and Timing Policy – Fact Sheet, <http://pnt.gov/policy/>, 2004.
- Weber, T.; Trautenberg, H. L.; Schäfer, Chr.: GALILEO System Architecture – Status and Concepts, Proceedings of ION GPS 2001, Salt Lake City, September 2001.

Anschrift der Autoren

Privatdozent Dr.-Ing. habil. Torben Schüler
Dipl.-Math. Stefan Wallner
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Eissfeller
Institut für Erdmessung und Navigation
Universität der Bundeswehr München
85577 Neubiberg
torben.schueler@unibw.de
stefan.wallner@unibw.de
bernd.eissfeller@unibw.de