Galileo, GNSS, EGNOS und WAAS – Neues aus der Welt der Satellitennavigation

Dipl.-Ing. Erich H. Franke, DK6II – D-75203 Königsbach-Stein – email: dk6ii@afusoft.de

Beitrag zur 47. UKW-Tagung 2002 in Weinheim

Nach dem Ende des Kalten Krieges hat sich der Schwerpunkt der Nutzung der Satellitennavigation von der überwiegend militärischen hin zu kommerziellen, technischen und wissenschaftlichen Anwendungen verlagert. Mit der Verbreitung der Satellitennavigation im täglichen Leben wächst naturgemäß der Wunsch nach besserer Genauigkeit, höherer Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit derartiger Systeme. In folgendem Beitrag wollen wir uns mit dem aktuellen Stand dieser Techniken beschäftigen.

Königsbach-Stein, im Juli 2002

Zweieinhalb Systeme

Zwei Satellitennavigationssysteme sind heute, d.h. 2002 für den zivilen Einsatz – zumindest theoretisch – verfügbar. Zum ersten ist es das U.S. Amerikanische „*Global Positioning System*“ (GPS) und das von der ehemaligen UdSSR installierte „*Global Navigation Satellite System*“ (GLONASS). Das Programm GALILEO der Europäischen Union soll ab ca. 2008 ein Gegengewicht zu dem dominierenden GPS-System bilden.

Dem Gedanken an eine internationale Initiative folgend, werden die Navigationssysteme nebst den Verfahren zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit und Systemverfügbarkeit unter dem Oberbegriff *Global Navigation Satellite System* (GNSS) zusammengefaßt. Hierzu später mehr.

Update GPS (U.S.A.)

Im Jahre 1983 wurde das vom amerikanischen Verteidigungsministerium (U.S. Department of Defense, DoD) genutzte und ursprünglich als rein militärisches Navigationssystem konzipierte Global Positioning System (GPS) im INMARSAT Act durch den U.S. Senat für den zivilen Einsatz freigegeben. Bis Ende 1999 war die Nutzung dieses Systems nach wie vor bevorzugt militärisch und steht nach wie vor unter der alleinigen Kontrolle der Vereinigten Staaten von Amerika [USNOGPS] [UKW90].

Beruhend auf seiner militärischen Vergangenheit und der Angst, das System könne von Gegnern mißbräuchlich zur Steuerung von Lenkflugkörpern genutzt werden, wurden zivile Anwendungen auf den sogenannten Standard Positioning Service (SPS) beschränkt. Bis zum Mai 2000 wurden die Aussendungen des SPS bzw. des Coarse Acquisition Codes (C/A) auf der Trägerfrequenz L1 1.575,42 MHz durch die Anwendung der sogenannten „Selective Availability“ (SA) in ihrer Genauigkeit auf bestenfalls 100m horizontal und 156m vertikal beschränkt.

Auch nach Wegfall dieser künstlichen Verschlechterung durch Beschluß des Präsidenten [USA_SA_PS] ist das System nur beschränkt genau. O.g. Beschluß vom Mai 2000 muß insbesondere als Antwort auf die Ankündigung der Europäischen Kommission von Ende 1999 gewertet werden, das Europäische Programm Galileo zu starten.

Die bei handelsüblichen GPS-Empfängern der unteren Preiskategorie übliche Messung der Signallaufzeit über Korellation der Codephase ergibt eine nur begrenzte Genauigkeit von ca. 50m bis 20m. Die Fehler, die somit der des verschlüsselten „Precision Positioning Service“ (PPS) entsprechen rühren dabei von übergreifenden Effekten her, wie Laufzeitschwankungen in der Troposphäre wie auch von lokalen Effekten wie z.B. Mehrwegeempfang und Signalreflexionen [UKW99].

Höhere Genauigkeiten bis hin in den Zentimeter-Bereich sind durch Messung der Trägerphase über einen längeren Zeitraum und durch Nutzung der zweiten Frequenz L2 möglich. Geräte in dieser Genauigkeitsklasse sind entsprechend teuer (50k€ und mehr) und werden fast ausschließlich im Vermessungswesen eingesetzt.

Für den Massenmarkt und für kostensensitive Anwendungen die jedoch höhere Genauigkeit benötigen, wurde die Differenz-GPS-Technik eingeführt. Dabei werden in die Lösung zur Positionsbestimmung neben dem von den Satelliten gelieferten Navigationssignal sogenannte Differenzkorrekturdaten eingerechnet, die die Fehler des Satellitensignals zumindest teilweise kompensieren sollen. Hierzu später mehr.

Die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des GPS-Systems ist in der Nordhemisphäre, vor allem über den U.S.A. und Europa recht hoch. Derzeit sind 28 Satelliten im Einsatz, so daß eine gewisse Redundanz besteht. In den Polarregionen jedoch ist die Überdeckung lückenhaft, eine Tatsache, die Nutzer in der Luftfahrt besonders stört, gehen eine ganze Reihe der Fernflugrouten über diese Gebiete.

Als problematisch wird vielfach die Abhängigkeit des Systems von Entscheidungen der U.S. Regierung angesehen. Es besteht das – wenn auch eher theoretische – Risiko, daß die zivile Nutzung des SPS während einer Krise oder einem militärischen Konflikt eingeschränkt oder gar verhindert wird.

Über Verträge und Anweisungen an die Industrie werden fernerhin bestimmte Eigenschaften der Kontrolle des U.S. DoD unterworfen, so etwa in der „Missile Technology Control Regime“ (MTCR), durch die handelsübliche GPS-Empfänger für den Einsatz in ballistischen und Marschflugkörpern unbrauchbar gemacht werden sollen. So dürfen derartige Empfänger beispielsweise in Höhen oberhalb 60.000 ft (18,3 km) bzw. Geschwindigkeiten größer 1000 Kn (510 m/s) keine gültige Position liefern. Für nicht-militärische Anwendungen sind diese Grenzwerte im Regelfall irrelevant.

Obgleich das System technisch stabil erscheint, werden immer einmal wieder Genauigkeitssprünge oder auch Signalausfälle gemessen, so beispielsweise während der Konflikte auf dem Balkan. Diese Unstimmigkeiten, die bei Kurzzeitanwendungen meist auch nicht ins Gewicht fallen, treten durch der Orbital-Verschiebungen und Neupositionierungen von Satelliten auf, die durch den Betreiber erfolgen um an bestimmten Orten eine – militärisch notwendige – höhere Verfügbarkeit zu erhalten. Die Leidtragenden sind dann zivile Nutzer, beispielsweise in der Luftfahrt, für welche bis heute keine Verfügbrkeitsgarantie besteht.

Update GLONASS (Rußland)

Ähnlich alt ist GLONASS, die Antwort der ehemaligen Sowjetunion auf das GPS-System. Das „Global Navigation Satellite System“ wird heute von Rußland vom „Russian Federation Government / Russian Space Forces“ [GLONASS] betrieben und ist als Standard Precision (SP) für zivile Nutzung freigegeben. Ein sog. High Precision Dienst (HP) ist militärischen Anwendungen vorbehalten.

Ähnlich wie GPS basiert die Standortbestimmung auf der Bestimmung der Abstände individueller Satelliten zum Empfänger (Pseudorange) über die Signallaufzeit. Ein wichtiger Unterschied ist allerdings, daß die sichtbaren Satelliten auf individuellen Frequenzkanälen senden. Die Trägerfrequenz hierbei beträgt 1.602,0 MHz, weitere Kanäle liegen im Abstand von 562,5 kHz hiervon. Wie bei GPS kommt bei GLONASS binäre Phasenumtastung (BPSK) mit 50 Bit/sec zum Einsatz

Ebenfalls wie bei GPS werden jeweils vier Satelliten für eine 3D Positionsbestimmung benötigt. Die resultierende horizontale Genauigkeit wird von offizieller Seite mit 57-70m (99.7%) und die vertikale mit 70m (99.7%) angegeben. Höhere Genauigkeit kann – wie bei GPS – durch Anwendung von Differenzkorrektur bzw. durch Trägerphasenmessung erzielt werden.

Die Genauigkeit der Zeitbasis, nutzbar am Emfangsort ist als besser 1µs (95%) spezifiziert.

Die gesamte GLONASS Konstellation soll einmal aus 24 Satelliten in drei Abstandskäfigen bestehen, wobei die Bahnen der acht der jeweiligen Bahnebenen um 45°, die drei Ebenen dabei um jeweils 15° versetzt sind. Die Bahnhöhe beträgt ca. 19100 km und die Satelliten umrunden die Erde in ca. 11 Stunden und 15 Minuten. Die Bahnen sind so gewählt, daß im Endausbau immer mindestens fünf Satelliten sichtbar sein sollen. Soweit die offiziellen Informationen. Heute, d.h. 2002 ist die Zahl an operationellen Satelliten lange nicht erreicht.

Im praktischen Einsatz zeigt sich GLONASS als technisch recht empfindlich. Die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bleibt hinter der von GPS deutlich zurück. Auch der russische Betreiber gibt für das System keinerlei Garantien bezüglich der Verfügbarkeit.

Unzweifelhaft ist jedoch der praktische Vorteil der Kombination aus GPS und GLONASS zur Erhöhung der Anzahl sichtbarer Satelliten. Eine Reihe von Firmen wie z.B. Magellan bieten hierzu Kombinationsempfänger an, durch die die Systemverfügbarkeit deutlich gesteigert werden kann.

Galileo (Europa)

Hinter dem Namen Galileo verbirgt sich die Initiative Europas, das de facto Monopol der U.S.A. auf dem Gebiet der Satellitennavigation zu brechen [ESA_GALLILEO].

Galileo zielt als rein ziviles System auf Massenanwendungen im privaten, im geschäftlichen und im sicherheitstechnischen Umfeld. Der Treiber ist hierbei die Zivilluftfahrt, die auf ein System für Anflug und Landung der Kategorie CAT-I hofft [NAVAIDS].

Bis zur geplanten Indienststellung in 2008 werden nach offiziellen Angaben ca. 3.5 Mrd Euro benötigt werden. Das Potential der Anwendungen und der erzielte Markt hingegen werden mit über 10 Mrd Euro veranschlagt, eine stolze Summe allenthalben.

Im Jahre 1999 beschloß die Europäische Transport Kommission (European Transport Council, ETC) den Start der Definitionsphase. Die EU beschloß den Beginn der Entwicklungsarbeiten im Jahre 2001.

Zwischen heute und ca. 2005 sollen die Hauptentwicklungen bearbeitet werden, so zum Beispiel die der benötigten Atomuhren mit der geforderten Genauigkeit von 10^{-9}. In diesem Zeitraum sollen zwei bis vier Satelliten gebaut und in den Orbit verbracht werden. Mit Hilfe dieser In-Orbit Validation (IOV) soll eine Qualifizierung des Systems erreicht werden und Risiken entgegengewirkt werden.

In den Folgejahren 2006 und 2007 sollen dann die restlichen 28 der insgesamt 30 Satelliten in den Orbit gebracht werden und das gesamte Bodensegment weltweit installiert werden.

Die kommerzielle Verfügbarkeit soll dann in den Jahren 2008 bis 2010 erzielt werden. Wir können also gespannt sein!

Galileo definiert zwei Anwendungsbereiche, den „Mass Market“ und den „Safety Related Market“. Zu ersterem zählen die vielfältigen Anwendungen in Fahrzeugen und in der Kommunikation. Der gemeinsame Faktor hier ist eine nur beschränkte Sicht zu den Satelliten durch Bebauung oder Bewuchs, sowie eine geringere Signalverfügbarkeit. Die angestrebte Genauigkeit beträgt ‚besser 10 m‘ bei 95% bei einem Maskenwinkel von mindestens 25° bei einer Verfügbarkeit von mindestens 70%.

Zum „Safety Related Market“ zählen die bereits erwähnten CAT-I Anflug und Landungen und Anwendungen auf Schiffen, bei denen die Sicht zum Himmel – und damit zu den Satelliten – gegeben ist. Die horizontale Genauigkeit soll hierbei besser als 4 m betragen, allerdings bei 5° Maskenwinkel. Die Verfügbarkeit soll besser als 99% bei garantierter ‚Integrity‘ sein.

Die dreißig Satelliten des Galileo-Systems sollen einmal in der Medium Earth Orbit (MEO) Anordnung in drei Bahnebenen in einer Höhe von ca. 23.222 km in Kreisbahnen mit jeweils einer Inklination von 56° die Erde umlaufen.

Neu an der Festlegung der Konstellation ist die Forderung nach nachweisbarer Verfügbarkeit, wie dies die Zivilluftfahrt fordert.

Die Galileo-Satelliten sollen auf insgesamt vier Frequenzen im L-Band senden, wobei dem reinen Navigationsanteil auch Nutzdaten im Bereich zwischen 250 und 1500 Bit/sec (vgl. GPS 50 Bit/sec), sowie ‚Pilotsignale' hinzugefügt werden sollen. Letztere sollen dazu dienen, die Effekte der Mehrwegeausbreitung zu minimieren, wie sie im mobilen Einsatz in stark bebautem Gelände sowie bei landenden Flugzeugen auftreten können.

Die Forderung nach höherer Datenrate – die andererseits die Qualität des Navigationssignals beeinträchtigen kann – kommt insbesondere aus der Industrie, um ‚Mehrwertdienste' wie Verkehrs- und Tourismusinformationen, Landkartenupdates etc. mit zu versenden. In Sicherheitskritischen Applikationen könnten dies wiederum Zuverlässigkeitsinformationen, Wetterinformationen und Alarmierungsmeldungen sein. Die Definition von Datenraten und –inhalten ist noch nicht abgeschlossen.

Ebenfalls derzeit in Arbeit sind sogenannte ‚kritische Komponenten', insbesondere für den Satelliten. Diese Satelliten sollen ca. 650 kg an Masse besitzen und im Betrieb mittels Sonnenkollektoren 1500 Watt umsetzen. Die Satelliten sind so ausgelegt, daß mehrere davon in der Aufbauphase mit ARIANE transportiert werden können.

Als kritische Komponenten gelten heute (2002) das Rubidium-Normal (Rubidium Atomic Frequency Standard, RAFS), der MASER[1] (Passive Hydrogen Maser, PHM) und der Leistungsverstärker mit Ausgangsmultiplexer. Das Zeitnormal muß, wie bei den anderen Satellitennavigationssystemen auch über eine hohe Stabilität unter den im Raum herrschenden Umweltbedingungen besitzen.

Verbesserung heutiger Systeme

Obgleich die Entscheidung zur Entwicklung von Galileo nunmehr getroffen wurde, ist es bis zur kommerziellen Nutzbarkeit des Systems sicher noch ein weiter Weg.

Daher liegt das Augenmerk auf der Nutzung und ggf. Verbesserung der heute verfügbaren satellitengestützten Navigationssystemen. Dabei sind Techniken zur Verbesserung der Systemverfügbarkeit zum einen von denen zur Verbesserung der Genauigkeit zu unterscheiden.

Kombination GPS - GLONASS

Eine Technik zur Verbesserung der Verfügbarkeit ist die bereits erwähnte Kombination von GPS und GLONASS auf Seiten des Empfängers. Da beide Systeme im L-Band arbeiten ist bei den sowieso notwendigen Empfängerbandbreiten der Empfang der Frequenzen 1575,42 MHz und 1602,0 MHz kein prinzipielles Problem. Mit Hilfe digitaler Empfangstechniken können die Signale beider Systeme quasi-parallel ausgewertet und in die Navigationslösung eingerechnet werden.

Durch die höhere Anzahl an nunmehr verfügbaren Satelliten kann der Empfänger diejenigen mit ‚guter' Geometrie, d.h. niederer Dilution of Precision (DOP) aussuchen, bzw. an Orten mit prinzipiell geringer Satellitenanzahl – beispielsweise in den Polarregionen – überhaupt eine stabile Navigationslösung berechnen.

[1] Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Bedingt durch die Unterschiede in den Eigenschaften von GPS und GLONASS wird dadurch allerdings nicht automatisch immer eine höhere Genauigkeit erzielt, der Effekt liegt, wie gesagt, hauptsächlich in der Erhöhung der Vefügbarkeit.

Verbesserung von GPS mittels konventioneller, landbasierender Systeme (GBAS)

Der spektakulärste Weg zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit hingegen liegt in der sogenannten Differenzkorrektur, bei GPS als Differential GPS (DGPS) bezeichnet. Wir werden im folgenden Text „Ground Based Augmentation Systems“ (GBAS) als Synonym für Differenzkorrektur bezeichnen, da man diese Technik nicht nur auf GPS sondern sinngemäß auch auf GLONASS anwenden kann, obgleich Differenztechniken für GLONASS zwar definiert und experimentell erprobt, im größeren Maßstab derzeit jedoch nicht eingesetzt werden [GLONASS].

Das am weitesten verbreitete Differenzkorrektursystem stammt aus der Schiffahrt. Es basiert auf einem Netz von Langwellensendern, die in Küstennähe Korrekturdaten im Format RTCM-104 aussenden. RTCM steht dabei für *Radio Technical Commission for Maritime Services*, dessen *‚Special Committee No. 104‘* den entsprechenden Standard erarbeitet hat (siehe hierzu auch [UKW_99]).

Die Langwellensender arbeiten mit FSK mit einer Bitrate von 100 Bit/sec bzw. 200 Bit/sec. Kommerziell sind hierfür Empfänger erhältlich, auch solche, die verschiedene Korrekturverfahren kombinieren [RAVEN6].

In den U.S.A. beispielsweise wird dieses Netz von Differenzkorrektursendern von der U.S. Coast Guard betrieben und kann frei empfangen und genutzt werden. Empfänger für diese Sender sind im Handel erhältlich.

In Ländern wie Deutschland und Spanien werden zudem Differenzkorrekturdaten über den öffentlich-rechtlichen UKW-Rundfunk nach dem RASANT-Verfahren verbreitet. RASANT steht *für Radio Aided Satellite Navigation Technique* und nutzt einzelne Gruppen des *Radio Data Systems* (RDS) gemäß (EN 50067).

Auch hierfür sind entsprechende Empfänger und Decoder verfügbar. RASANT ist insbesondere interessant, da der Empfang nicht an laufende Gebühren gebunden ist sondern durch einen einmaligen Betrag beim Kauf des entsprechenden Empfängers abgegolten wird.

In anderen Ländern, beispielsweise der Schweiz erfolgen diese Aussendungen im kommerziellen Rahmen durch Firmen wie DCI (Differential Corrections Incorporated) und sind gebührenpflichtig.

In Deutschland wiederum existiert unter dem Namen SA*Pos* ein Netzwerk *der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen* (AdV), in dem – wiederum gebührenpflichtig – Korrekturdaten über lokale Sendestationen im VHF-Bereich um 160 MHz ausgestrahlt werden [SAPOS].

Alle diese Sender haben gemein, daß die Referenzstationen, also die Stelle, die die Satellitensignale mit der exakt vermessenen Position vergleicht um die Abweichung und damit den Korrekturwert zu bestimmen, ‚in der Nähe‘, d.h. meist weniger als 100 km vom Ort des potentiellen Nutzers dieser Daten steht.

Je weiter die Referenzstation vom Nutzer entfernt ist, desto geringer fällt die Korrektur aus, da schließlich beide Stellen ein und dieselben Satelliten empfangen müssen um die individuellen Pseudorange-Korrekturen zu erzeugen.

Eine Ausnahme von dieser Regel ist in Deutschland ALF, das von der Telekom im Längstwellen-Bereich auf 122,5 kHz betrieben wird und aus Mainflingen bei Frankfurt die gesamte Bundesrepublik nebst ggf. den Anrainerstaaten versorgt. ALF benutzt trotz der niederen Sendefrequenz Phasenumtastung und ein Datenformat ähnlich dem des Radio Data Systems RDS, wobei der interne Gruppenaufbau ganz auf die Aussendung der Differenzkorrekturdaten angepaßt wurde. Der Emp-

fang von ALF ist gebührenpflichtig, wobei ähnlich wie bei RASANT, diese Gebühr beim Kauf des entsprechenden Decoders entrichtet wird.

Messungen ‚aus der Nähe', d.h. im 100 km Umkreis um Frankfurt ergeben keine wesentlichen Unterschiede zwischen RASANT und ALF. Über Abweichungen über weitere Distanzen hingegen können hier keine Angaben gemacht werden.

Satellitengestützte GPS Differenzkorrektur (SBAS)

Im Gegensatz zu den oben diskutierten landgestützten Differenzkorrketursystemen, die über Längstwelle, VHF-Funk oder Rundfunk arbeiten, verteilen die *satellitengestützten „Satellite Based Augmentation Systems*" (SBAS) die Korrekturinformation wiederum über Satellit.

Weltweit gibt es dazu drei annähernd kompatible Vertreter die als jeweiliger Beitrag zum Global Navigation Satellite System GNSS-1 gerechnet werden.

In den U.S.A. bzw. über dem amerikanischen Kontinent ist es das von *der United States Federal Aviation Administration* (FAA) entwickelte *„Wide Area Augmentation System*" (WAAS). Japan bzw. das *Civil Aviation Bureau Japan* (JCAB) trägt mit dem *„MTSAT Satellite-Based Augmentation System*" (MSAS) international bei.

Die Europäische Initiative der *„European Tripartite Group*" (ETG), die sich aus *der European Space Agency* (ESA), der European Union (EU) und Eurocontrol zusammensetzt, läuft unter dem Namen *„European Ground Navigation Overlay System*", kurz EGNOS genannt. EGNOS wird auch – ein wenig werbewirksam – als erste Stufe des Galileo-Programmes genannt, sicherlich, um den Anspruch Europas zu untermauern, zukünftig eine Schlüsselrolle auch auf der Betreiberseite zu spielen.

Alle drei Systeme haben gemein, daß die Daten zur Positionierungsverbesserungen und Integritätssteigerung über Satellit im L1-Band, d.h. kompatibel zum GPS-System im Broadcast-Verfahren ausgestrahlt werden. Bei WAAS erfolgt die Ausstrahlung über die geostationären Satelliten des INMARSAT-Systems IIIs: POR (3-F3, Pacific Ocean Region, 178° Ost) and AOR-W (3-F4, Atlantic Ocean Region-West, 54° West).

Im Europäischen Bereich sind dies AOR-E (3-F2, Atlantic Ocean Region-East, 15.5° West) and IOR (3-F1, Indian Ocean Region, 65,5° Ost) sowie der jüngst in Betrieb gegangene Satellit ARTEMIS (21.5° Ost) der European Space Agency (ESA).

Das japanische System stützt sich neben POR auf den japanischen „Multi-functional Transport Satellite" (MTSAT) ab, der neben Aufgaben in der Navigation auch meteorologische Aufgaben wahrnimmt.

In Zukunft könnten insgesamt 19 WAAS/EGNOS/MSAS weltweit eingesetzt werden, jedenfalls gemäß der FAA-Richtlinie TSO C-146. Dabei wurden zwecks Code-Multiplex GPS-kompatible Pseudo-Random Korrelationscodes festgelegt, damit die Aussendungen auf L1 mit den auf der gleichen Frequenz sendenden GPS-Satelliten verträglich sind. Zur Anwendung kommen 1023 bit Gold Codes mit guter Orthogonalität zu den GPS-Codes. Die Nutzbitrate beträgt 250 Bit/sec mit 2:1 Redundanz (‚Luft'-Bitrate ist 500 Bit/sec). Im Vergleich hierzu beträgt die Bitrate des klassichen GPS-Systems 50 Bit/sec.

Desweiteren wurden diesen Satelliten GPS-kompatible „Space Vehicle Codes“ (SVC) im Bereich von 33 bis 51 zugewiesen, wie dies bereits durch eine Empfehlung der NMEA vorgesehen sind:

Satellit	PRN	SVC
AOR-E	120	33
AOR-W	122	35
IOR	131	44
POR	134	47
MTSAT-1	129	42
MTSAT-2	137	50
ARTEMIS[2]	?	?

GPS-Empfänger bzw. nachgeschaltete Navigationssysteme können dann die SBAS Satelliten wie GPS-Satelliten verwalten und Parameter etc. anzeigen.

Die Anforderungen an die Genauigkeit, Integrität und ‚Continuity of Service‘ werden sowohl von der Luftfahrt als auch sicherheitskritschen Landanwendungen getrieben: Für einen Anflug in Kategorie CAT-I muß der Landekurs auf min. 16m, der Gleitpfad auf min. 4-6m ‚stimmen‘[3]. Wichtiger als die Genauigkeit ist die Integrität, die 10^{-7} pro Anflug betragen muß sowie die kontinuierliche Signalverfügbarkeit, die – basierend auf den gültigen Anflugprozeduren und kritischer Zeitabschnitte während der eigentlichen Landung – nicht schlechter als $1\text{-}8*10^{-8}$ in jedem beliebigen 15 Sekunden langen Zeitabschnitten bei einer Vorwarnzeit bei Ausfällen von mehr als 6 Sekunden sein darf [GNSS_PS].

Bei den Anwendungen zu Wasser spielt die horizontale Genauigkeit eine große Rolle, wobei bedingt durch die geringeren Geschwindigkeiten die Vorwarnzeiten großzügiger ausfallen können.

Interessant zu bemerken sind Anwendungen in der Eisenbahntechnik, wobei auch hier die geforderten Genauigkeiten zur Detektion von Parallelgleisen im Meter-Bereich liegen und die Anforderungen an die Integrität denen der Fluganwendugen in nichts nachstehen.

Dabei ist zu beachten, daß man gleichzeitig die Signale von fünf oder mehr Satelliten auswerten muß, um ein Problem, das durch einen Satelliten hervorgerufen wird, zu erkennen. Diese Faustregel sagt auch, daß man ein Problem nur dann auf den fehlerhaft arbeitenden Satelliten eingrenzen kann, wenn man sechs oder mehr Satelliten ‚sieht‘. Derartige Informationen sind im klassischen GPS-System nicht oder nur sehr eingeschränkt vorhanden.

Bei EGNOS senden die geostationären Satelliten nun neben den „Wide Area Differential“ (WAD) Daten zur Verbesserung von GPS und GLONASS auch zusätzlich eigene GPS-ähnliche Navigationssignale – nur eben von den dreien über Europa sichtbaren stationären Satelliten – die als „GEO Ranging Data“ (R-GEO) bezeichnet werden. Im „GNSS Integrity Channel“ (GIC) werden zudem Informations-‚Flags‘ über die Verfügbarkeit von GPS, GLONASS und EGNOS ausgesendet.

In der Bedeutung dieser ‚Flags‘ liegt ein subtiler wenngleich wesentlicher Unterschied zwischen WAAS und EGNOS. Moderne Empfängergenerationen müssen in ihrer Software diese Unterschiede erkennen und auswerten, damit sie für beide Systeme tauglich sind.

Interessant in diesem Zusammenhang ist, daß die EGNOS-Satelliten einfach nur Transponder an Bord haben, d.h. keine spezielle Navigations-Elektronik. Alle Signale werden am Boden in den weiter unten erwähnten NLES quasi ‚mundgerecht‘ aufbereitet und von den geostationären Satelli-

[2] Dem Verfasser (noch) nicht bekannt

[3] CAT-I bedeutet, daß der Pilot ab der ‚Entscheidungshöhe‘ 200ft bei 1NM Distanz Sicht zur Landebahn haben muß.

ten lediglich weiter verteilt. Dies hat den Vorteil, daß Änderungen an Datenprotokollen und –inhalten auch während der Nutzungsphase leicht möglich sind.

Schauen wir uns den Zeitplan des Europäischen Vertreter EGNOS näher an. Das Systemdesign ist bereits seit Ende 1997 abgeschlossen. Das System befindet sich derzeit in einer Testphase (Advances Operational Capability, AOC), wobei die Datenstrukturen seit längerer Zeit festliegen. Nach dem im ersten Quartal 2003 geplanten „Factory Qualification review“ sollen ab Mitte 2003 reguläre Aussendung des AOC signals erfolgen.

Der Regelbetrieb (Final Operational Capability, FOC) wird wegen des laufenden Ausbaus des Bodensegmentes jedoch erst nach dem Operational Readiness Review, das für April 2004 eingeplant ist, aufgenommen.

Jedoch ist bereits heute (2002) die Korrektur mittels EGNOS in Deutschland meistens möglich. Die erzielte Genauigkeit erreicht dabei im Vergleich zum Standard-GPS beeindruckende 4m und darunter. Durch Kombination der satellitengestützten Korrektur über EGNOS mit konventionellen landgestützten Verfahren wie RASANT kann darüber hinaus eine erhebliche Steigerung der Systemverfügbarkeit und Zuverlässigkeit erreicht werden [RAVEN6].

Auch sind bereits kombinierte GPS/EGNOS Handgeräte erhältlich, die im praktischen Einsatz im Feld im Vergleich zu herkömmlichen Empfängern eine erheblich verbesserte Genauigkeit besitzen (z.B. [MAGELLAN]).

Das EGNOS System benötigt neben der Verteilsatelliten (Raumsegement) eine erhebliche Infrastruktur am Boden. Momentan sind 34 sogenannter „Ranging and Monitoring Stations“ (RIMS) definiert, die ihre Beobachtungen an vier redundante „Mission Control Centers“ (MCC) in Torrejon (Spanien), Ciampino (Italien), Gatwick (U.K.) und Langen (Deutschland) weiterleiten. Diese MCC bestimmen die Differenzkorrekturdaten und Ionosphärenparameter sowie die Integritätsinformation und senden diese über die sieben vorgesehenen „Navigation Land Earth Station“ (NLES) zum Raumsegement. Alle Anteile des Bodensegmentes sind über das EGNOS Wide Area Network (EWAN) miteinander verbunden. Weitere Informationen kann man [ESA_EGNOS] entnehmen.

Eine Zielsetzung von EGNOS, dessen Hauptanwendungsgebiete die Europäischen Staaten umfaßt, von der Türkei bis zur Nordsee und dem östlichen Teil des Atlantik ist die Erweiterbarkeit über diese geographische Region hinaus. Angedacht sind Anwendungen in Afrika und dem Nahen und Mittleren Osten, wohl auch, um als Gegengewicht den U.S. Amerikanischen Plänen nach Implementierung des GPS-Nachfolgers GPS-III frühzeitig entgegenzutreten.

Weitere Systemansätze am Boden (GBAS)

Vor allem im Bereich der Luftfahrtanwendungen zu sehen ist die Anwendung sogenannter „Pseudo-Satelliten“ (Pseudolites). Hierunter versteht man die Maßnahme, Sender am Ort hohen Genauigkeitsbedarfes – etwa einer Landebahn – am Boden zu plazieren. Diese Sender strahlen nun GPS-kompatible Navigationssignale aus. Der Bordempfänger eines landenden Flugzeuges kann diese Aussendungen nun aufnehmen und mit zur Berechnung der Navigationslösung heranziehen.

Diese Anordnung von Pseudolites am Boden würde beispielsweise die Fehler in der Höheninformation dramatisch verringern und so Landungen in Kategorie CAT-III – zumindest aus Sicht der Navigationsgenauigkeit – möglich machen.

Allerdings ist durch die Pseudolites das Problem der nicht garantierten Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des GPS-Systems selbst nicht gelöst. Die für CAT-III geforderten – und mithin durch die heute üblichen Instrumenten-Landesysteme (ILS) und Mikrowellen-Landesysteme (MLS) erzielten Zuverlässigkeitswerte – werden vom existierenden GPS-System in der heutigen Form lange nicht erreicht.

Außerdem sind technische Hindernisse zu überwinden, beispielsweise den Capture Effect durch die erheblichen Pegelunterschiede zwischen den Signalen vom Raumsegment und dem der Pseudolites. Die Aussendungen der Pseudolites würde ohne weitergehende Maßnahmen die Signale der orbitalen Satelliten in Flughafennähe bei gegebenem Dynamikbereich von GPS-Empfängern unhörbar machen.

Außerdem sind die Datenstrukturen der Ephemeriden bzw. der Almanachdaten im klassichen GPS-System nicht für stationäre Pseudo-Satelliten ausgelegt. Software-Änderungen sind die Folge.

Ein weiterer Ansatz ist die Idee unter dem Begriff EUROFIX das konventionelle GPS bzw. GLONASS mit Loran-C zu verbinden und Referenzdaten über die existierenden Loran-C Stationen mit auszusenden. Ob sich diese Interimslösungen langfristig durchsetzen bleibt dahingestellt.

Schlußfolgerung

Der Markt für Satellitennavigationssysteme wird heute, d.h. im Jahre 2002 als ebenso dynamisch angesehen wie zuvor der der Mobilkommunikation und der kommerziellen Internet-Nutzung.

Die Ergänzung des durch die U.S.A. dominierten GPS-Systems durch das Europäische Galileo-System wird sicherlich wissenschaftliche, technische und kommerzielle Impulse in Europa auslösen. Erwähnt sei hier eine Markschätzung von mehr als 10 Mrd Euro in Europa und einem weltweiten Potential von mehr als 50 Mrd Euro.

Der Gedanke daß heute bestehende Systeme zusammen mit im Forschungsstadium befindlichen Technologien zu einem globalen Programm wie GNSS kombiniert werden sollen, das in alle Lebensbereiche einwirkt, läßt auf eine Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit hoffen. Wir dürfen darauf gespannt sein.

Quellen

[ESA_EGNOS] European Space Agency; „Web Site EGNOS“; http://www.esa.int/EGNOS

[ESA_GALILEO] European Space Agency; „Web Site GALILEO“; http://www.esa.int/GALILEO

GLONASS Russian Federation Ministery of Defense; „Global Navigation Satelllite System (GLONASS)“; http://www.rssi.ru/SFCSIC/SFCSIC_main.html

[GNSS_PS] R. Oosterlinck, L. Gauthier; „EGNOS: The first European Implementation of GNSS – Project Status“; European Space Agency (ESA); IAF-01-M.3.02; http://www.esa.int/navigation

[MAGELLAN] Magellan SporTrack; http://www.thalesnavigation.com

[NAVAIDS] Franke, E.H., DK6II; „Terrestrische und satellitengestützte Radio-Navigationssysteme für die Luftfahrt“; Skriptum zum Vortrag auf der 43. UKW-Tagung 1998; Weinheim; http://www.afusoft.de/medien/hamradio/publications/UKW98/ukw98.html

[RAVEN] AFUSOFT RAVEN; http://www.afusoft.de

[SAPOS] http://www.sapos.de

[USNOGPS] United States Naval Observatory; „USNO NAVSTAR Global Positioning System“; http://www.usno.navy.mil/gpsinfo.html

[UKW90] Franke, E.H., DK6II; "Das GPS-Satelliten-System - Eine Einführung“; Skriptum zum Vortrag auf der 37. UKW-Tagung 1992 in Weinheim; http://www.afusoft.de/medien/hamradio/publications/UKW90/ukw90.html

[USA_SA_PS] The White House Office of the Press Secretary; „STATEMENT BY THE PRESIDENT REGARDING THE UNITED STATES' DECISION TO STOP DEGRADING GLOBAL POSITIONING SYSTEM ACCURACY“; May 2000

[UKW99] Franke, E.H., DK6II; "Genauigkeitssteigerung bei GPS-basierenden Navigationssystemen“; Skriptum zum Vortrag auf der 44. UKW-Tagung 1999 in Weinheim; http://www.afusoft.de/medien/hamradio/publications/UKW99/ukw99.html