

Satellite Based Augmentation Systems

Frank Schubert

Abstract – Gegenstand dieses Papers ist die prinzipielle Funktionsweise satellitenbasierter Systeme zur Verbesserung von globalen Navigationssystemen (SBAS). Nach einer Einführung in die globale Satellitenavigation werden Anforderungen der Luftfahrt beschrieben, die den Einsatz von SBASs z.B. für GPS als primäres Navigationsmittel erforderlich machen. Es folgt eine Darstellung von Algorithmen zur Korrektur ionosphärischer Fehler, die bei SBASs zum Einsatz kommen. Im Anschluss daran wird als Vertreter von SBASs auf das amerikanische WAAS und das europäische EGNOS eingegangen. Abschließend werden weitere erst durch SBASs mögliche Anwendungsszenarien dargestellt und die Zusammenarbeit verschiedener SBASs erläutert. Eine Online-Version dieses Dokumentes findet sich auf <http://www.chili23.de/sbas>.

Keywords – SBAS, GPS, GALILEO, GNSS, Cat. I, WAAS, EGNOS, SISNET.

1 Einleitung

Damit satellitenbasierte Navigationssysteme wie z.B. GPS oder GALILEO in sicherheitskritischen Umgebungen wie der Luftfahrt als primäres Navigationsmittel eingesetzt werden können, ist die Sicherstellung der Integrität sowie die Verbesserung der Positionsgenauigkeit und der Verfügbarkeit der Empfangssignale erforderlich. Vorgestellt werden der Aufbau und die Komponenten eines solchen SBAS, das diese drei Merkmale bereitstellt. Damit werden Landeanflüge unter schwierigen Bedingungen ohne weitere technische Maßnahmen an dem Flughafen ermöglicht. Das SBAS-Signal muss dafür bestimmte Bedingungen erfüllen. Der Einsatz eines SBAS ist in vielen weiteren Bereichen hilfreich. Es verschafft sich durch alternative Empfangsmöglichkeiten, z.B. über das Internet, einen großen Nutzerkreis.

2 Globale Satelliten-Navigationssysteme

Globale satellitenbasierte Navigationssysteme (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) ermöglichen die Bestimmung der eigenen Position und Geschwindigkeit auf der ganzen Welt. Dazu stellt ein GNSS eine Anzahl von Satelliten auf verschiedenen Umlaufbahnen um die Erde und

ein Bodenkontrollsegment bereit. Die Satelliten senden permanent ihre derzeitigen Positionen und ihre eigene Uhrzeit auf einem Funkkanal aus. Die Uhrzeit erhalten sie aus einer hochgenauen Atomuhr, die sich in jedem Satelliten befindet. Aus dem Vergleich der Empfängeruhrzeit und der Satellitenuhrzeit kann die Laufzeit des Signals von Satellit zu Empfänger gemessen werden. Daraus errechnet sich leicht die Entfernung zu den einzelnen Satelliten. Aus den Entfernungen und den Positionen von drei Satelliten kann somit die eigene Position bestimmt werden. Da es zu aufwändig wäre, in jeden Empfänger eine hochgenaue Uhr zu installieren, wird noch ein vierter Satellit benötigt, um den Uhrenfehler zu berechnen. Bodenstationen korrigieren fortlaufend Uhren- und Positionsfehler der Satelliten. Je mehr Satelliten zur Berechnung herangezogen werden, desto genauer wird die Positionsangabe.

2.1 Fehlerquellen

Die Genauigkeit der Entfernungsbestimmung zu den Satelliten hängt von verschiedenen Faktoren ab: So stimmen die vom Satelliten übermittelten Positionsdaten nicht vollständig mit seiner Position überein. Die Uhrzeiten der Satelliten sind nicht exakt synchron zueinander. Die größten Auswirkungen haben allerdings die atmosphärischen Fehler. In der Ionosphäre ist das Funksignal ionisierten Teilchen ausgesetzt. Sie stellt damit ein dispersives Medium dar, das die Laufzeit des Signals je nach Empfangsort ändert. Der Parameter mit dem größten Einfluss ist die Elektronendichte *Total Electronic Content* (TEC). Sie hängt von Faktoren wie der Position des Empfängers, der Jahreszeit, der Sonnenaktivität und dem Magnetfeld der Erde ab und lässt sich nicht direkt berechnen. Durch Aussendung des identischen Navigationssignals der Satelliten auf zwei unterschiedlichen Frequenzen lässt sich die TEC eliminieren. Damit lassen sich genauere Entfernungsmessungen erzielen. In der Troposphäre kommt es durch klimabedingte Einflüsse wie Wasserdampf ebenfalls zu Laufzeitänderungen. Dieser Fehler kann durch mathematische Modelle, in welche die Position und das Datum eingehen, gemildert werden.

Durch Reflexionen des empfangenen Signals, z.B. an Gebäuden, empfängt der Nutzer ein weiteres, falsches Signal, was zu Fehlern in der Entfernungsmessung zu den Satelliten führt. Außerdem behalten sich die Betreiber von GNSS vor, zusätz-

liche Ungenauigkeiten zu implementieren, um z. B. in Krisenfällen die Genauigkeit zu reduzieren (*Selective Availability*). Da das empfangene GNSS-Signal sehr schwach ist, kann es bewusst (*Jamming, Spoofing, Meaconing*) oder unbewusst durch Sender mit der gleichen Frequenz gestört werden.

2.2 Global Positioning System (GPS) und Global Navigation Satellite System (GLONASS)

Das vom Verteidigungsministerium der USA entwickelte GPS umfasst 28 Satelliten auf sechs Umlaufbahnen um die Erde. Die Satelliten senden auf dem L1- und dem L2-Band Positions- und Zeitangaben. Die Satelliten verwenden *Code Division Multiple Access* (CDMA) als Vielfachzugriffsverfahren. Alle Satelliten senden auf derselben Frequenz. Auf der L1-Frequenz wird der für die Öffentlichkeit frei verfügbare *Coarse Acquisition-Code* (C/A-Code) ausgesendet. Mit ihm lassen sich Genauigkeiten um 20 m erreichen [1]. Der verschlüsselte *Precise-Code* (P-Code) ist dem Militär vorbehalten und wird auf dem L1- und dem L2-Band ausgesendet. Dadurch ist es möglich, den ionosphärischen Fehler zu korrigieren [11]. Mit dem P-Code lassen sich Genauigkeiten bis 1 m erreichen. Fünf Referenzstationen auf der ganzen Welt überprüfen die Positionen und Uhrenangaben der Satelliten und korrigieren sie entsprechend. Das Verteidigungsministerium der UdSSR entwickelte GLONASS. Es besteht große Ähnlichkeit zu GPS. Aufgrund finanzieller Schwierigkeiten sind derzeit nur sieben Satelliten im Orbit. Dadurch wird die Nutzung von GLONASS stark eingeschränkt.

2.3 GALILEO

GALILEO wird zur Zeit von der europäischen Union und der *European Space Agency* (ESA) entwickelt, um von GPS unabhängig zu werden. GALILEO ist den beiden erstgenannten Systemen technisch sehr ähnlich. Es wird 30 Satelliten auf drei Bahnebenen enthalten. 12-15 Referenzstationen sollen aufgebaut werden, welche die Positionen und Uhrenfehler der Satelliten protokollieren und korrigieren. Zusätzlich werden 16-20 Monitorstationen zur Überprüfung der Integrität errichtet. Die erreichbare Positionsgenauigkeit entspricht der von GPS. Für sicherheitskritische Anwendungen steht ein Dienst zur Verfügung, der in 99% der Zeit eine Genauigkeit von 4m in der Vertikalen garantiert [2]. GALILEO nutzt zur Kommunikation drei Frequenzen im L-Band. Es stehen somit mehrere zivile Frequenzen zur Verfügung. GALILEO kann im Gegensatz zu GPS bei hohen Maskenwinkeln¹ von 25° ohne Schwierigkeiten auch in Städten von hoher geographischer Breite empfangen werden.

¹der Winkel über dem Horizont, ab dem die Satelliten zur Berechnung herangezogen werden

Zusätzliche zu dem öffentlich verfügbaren Navigationsdienst und der Integritätsprüfung wird GALILEO noch folgende Dienste bereitstellen:

- Kommerzieller Dienst: Ermöglicht den Zugang zu zwei zusätzlichen Signalen, die einen höheren Datendurchsatz erlauben und die Genauigkeit verbessern. Dieser Dienst beinhaltet eine Übertragungsmöglichkeit für Daten von Servicezentren an Nutzer.
- Öffentlich regulierter Dienst: Er ermöglicht Standort- und Zeitangaben für spezielle Nutzer, die ein hohes Maß an Dienstkontinuität benötigen. Es werden zwei Navigationssignale mit verschlüsselten Codes bereitgestellt.
- „Search- and Rescue“-Dienst: Dieser Dienst ermöglicht die Ortung von Notfallsendern. Die GALILEO Satelliten leiten dabei das empfangene Notfallsignal und die Position an spezielle Bodenstationen weiter [3].

Die Aussendung erster Signale ist für 2005 geplant, GALILEO soll 2008 voll einsatzfähig sein [4].

3 GPS-Erweiterungen

Die folgenden Anmerkungen erklären Weiterentwicklungen des GPS-Systems, sie sind aber im Prinzip für jedes GNSS anwendbar.

3.1 Differentielles GPS (DGPS)

DGPS dient zur lokalen Verbesserung der Ortungsgenauigkeit. Eine exakt vermessene Basisstation empfängt das fehlerbehaftete GPS-Signal und berechnet für jeden Satelliten einen Korrekturwert, den sie über einen Funkkanal ausstrahlt. Nutzer, die sich in der Nähe der Basisstation befinden, können diese Korrekturwerte empfangen und die eigene Positionsangabe verbessern. Dadurch werden atmosphärische Fehler in der Nähe der Basisstation sehr gut neutralisiert. Mit DGPS können Genauigkeiten bis unter 1 m erreicht werden. DGPS ist bis maximal 300 km Abstand von der Basisstation sinnvoll.

3.2 Weitbereich-DGPS (WADGPS)

WADGPS arbeitet mit mehreren über einen großen Bereich verteilten Referenzstationen (RS). Die RS messen die Entfernungsfehler zu den GPS-Satelliten und melden sie einer *Master-Control-Station* (MCS). Diese zerlegt den Entfernungsfehler in seine Komponenten und berechnet ihn für die gesamte Region, nicht nur für den Ort der RS. Dadurch ist der Abstand zur RS nicht mehr relevant für die Korrektur des Entfernungsfehlers im Empfänger.

4 Satellite Based Augmentation System (SBAS)

Der nächste Schritt ist, mit einem SBAS die WADGPS-Korrekturen über Satelliten einem ganzen Kontinent zur Verfügung zu stellen. SBASs verbessern die Genauigkeit und Verfügbarkeit von GNSS und liefern zusätzlich eine Integritätsüberprüfung. Für die Luftfahrt ist GPS als alleiniges Navigationssystem nicht zugelassen. Gründe dafür sind die unzureichende Genauigkeit, die Störanfälligkeit und die fehlende Integritätsüberprüfung. Bei einem Präzisions-Landeanflug muss der Pilot ab einer gewissen Höhe entscheiden, ob er landet oder die Landung abbricht. Diese Entscheidungshöhe (*decision height*, DH) läßt sich abhängig von den gegenwärtigen Bedingungen wie in Tabelle 1 ersichtlich in drei Kategorien einteilen [12].

Kategorie	<i>decision height</i>	Sichtweite
Cat. I	200 Fuß (60 m)	\geq 2400 Fuß (730 m)
Cat. II	100-200 Fuß (30-60 m)	2400-1200 Fuß (365-730 m)
Cat. III	\leq 100 Fuß (30 m)	\leq 1200 Fuß (365 m)

Tabelle 1: Kategorien für Landeanflüge. (1 Fuß = 0,30479 m, Werte gerundet)

Cat. II und Cat. III-Landeanflüge erfordern hochgenaue Entfernungsmessungen in der Nähe der Landebahn und sind damit außerhalb der Möglichkeiten eines SBAS. Der Pilot muss innerhalb sechs Sekunden von seinem Navigationssystem gewarnt werden, falls die Integrität der Daten nicht gewährleistet werden kann. Die Integrität befasst sich mit der Frage, ob das empfangene GPS-Signal bestimmter Satelliten korrekt ist und beinhaltet dementsprechende Warnungen an die Nutzer. *Receiver Autonomous Integrity Monitoring* (RAIM) ermöglicht es dem Empfänger, selbsttätig zu entscheiden, ob ein Satellit fehlerhafte Daten liefert. Eine Methode besteht darin, mehr als vier Satelliten zur Positionsbestimmung heranzuziehen. Liefert ein Satellit Werte mit einer starken Abweichung zu den anderen Satelliten, wird er als fehlerhaft gekennzeichnet und nicht zur Positionsbestimmung verwendet. SBASs überprüfen mittels Basisstationen die Integrität der GNSS- und SBAS-Satelliten mit einer zeitlich garantierten Alarmierungszeit von sechs Sekunden. Dadurch gestatten sie die Anwendungen von GNSSs in der Luftfahrt und anderen sicherheitskritischen Bereichen.

Grundsätzlich basieren SBASs auf einem Netz-

werk von Referenzstationen, die GNSS-Messungen durchführen und sie an eine Kontrollstation weiterleiten. Diese berechnet aus den Daten der einzelnen RS Weitbereichs-Korrekturen für Satellitenentfernungen. Diese Korrekturen werden über geostationäre Satelliten (GEO) an die GNSS-Nutzer gesendet. Die GEOs stellen zusätzliche GNSS-Signale (Ranging-Signale) zur Verfügung, was die Verfügbarkeit eines GNSS erhöht. Flugzeuge sind vor allem bei schlechter Sicht beim Landeanflug auf spezielle *Instrument Landing Systems* (ILS) angewiesen. Diese Systeme sind an jedem Flughafen installiert, was hohe Kosten verursacht. Mit SBASs sind Flugzeuge in der Lage, Cat. I-Landeanflüge durchzuführen.

4.1 Algorithmen zur Bestimmung der ionosphärischen Störung

[14] beschreibt verschiedene Algorithmen, um die Verzögerungen in der Ionosphäre, die den größten Fehler in der Pseudorange-Bestimmung ausmachen, zu bestimmen: Gitterbasierte Verfahren, Methode der kleinsten Quadrate und die Analyse sphärischer Harmonischer. Alle Verfahren zeigen annähernd dieselbe Leistung, weswegen sich der Autor auf die Darstellung des gitterbasierten Verfahrens beschränkt:

Bei dem gitterbasierten Echtzeit-Algorithmus misst jede Referenzstation mittels eines Zweifrequenz-GPS-Empfängers die ionosphärische Verzögerung für den Abstand des Durchdringungspunkts des Satellitensignals durch die Ionosphäre (*pierce point*) zur Referenzstation. Der *pierce point* ist der Punkt auf der Verbindungslinie Referenzstation – Satellit in 350 km Höhe. Diese Informationen werden in Echtzeit an die Maststation weitergeleitet. Diese schätzt aus diesen Daten die vertikale ionosphärische Verzögerung für jeden Punkt eines festen imaginären Gitters, das alle 5° einen Gitterpunkt besitzt. Die Korrekturdaten werden dann über die GEOs an die Nutzer verteilt. Der Nutzer berechnet seinen eigenen *pierce point* zu dem Satelliten und interpoliert aus den Daten der angrenzenden vier Gitterpunkte die eigene ionosphärische Verzögerung und korrigiert damit die Pseudorange-Messung.

4.2 Wide Area Augmentation System (WAAS)

Das amerikanische WAAS verbessert ausschließlich GPS. Es benutzt Inmarsat-3 Satelliten (die eigentlich zur Telefonkommunikation mit Schiffen dienen) zur Kommunikation mit den GPS-Benutzern. Das WAAS-Ranging-Signal wird mit einem C/A-Code auf dem L1-Band ausgesendet und ist dem von GPS ähnlich. Es kann von leicht modifizierten GPS-Empfänger empfangen werden. [6] zufolge liefern die GPS-Verbesserungen durch WAAS

eine Genauigkeit von 1.5-2 m in der Vertikalen, welche Cat. I-Landeanflüge ermöglichen. Fehlfunktionen von GPS-Satelliten werden innerhalb von sechs Sekunden an die Nutzer weitergegeben. WAAS kann damit Cat. I-ILS an Flughäfen ablösen. Aktuelle Tests ergaben, dass WAAS diese Systeme sogar übertreffen wird [5].

Das WAAS-Signal liefert differentielle Korrekturen für die GPS-Satelliten und die geostationären WAAS-Satelliten. Weitbereichs-Referenzstationen (*wide area reference stations*, WRS) sind großräumig verteilte Stationen, welche die Positions- und Uhrensichale der GPS- und der WAAS-Satelliten empfangen. Die WRS liefern ihre Daten an die Weitbereichs-Zentralstation (*wide area master station*, WMS), welche die Integrität der Daten überprüft, differentielle Korrekturen errechnet und Verzögerungen durch die Ionosphäre für jeden beobachteten Satelliten berechnet. Sie überprüfen auch die Positions- und Zeitinformationen der GEOs. Diese Daten werden an Erdnavigationsstationen (*navigation earth station*, NES) weitergeleitet, welche die Daten an die GEOs senden.

Eine Arbeitsgruppe für Sicherheit, bestehend aus Vertretern der *Federal Aviation Administration* (FAA), *Raytheon* und *Mitre Corporation* wurde eingesetzt, die fortlaufend Komponenten von WAAS wie die Referenzstationen, die Uplink-Stationen und die Satelliten auf korrekte Funktion überprüft.

Das WAAS Signal ist seit 24.08.2000 für nicht sicherheitskritische Anwendungen verfügbar. Viele Hersteller haben WAAS-kompatible GPS-Empfänger für den Anwendermarkt entwickelt. Es sind bereits mehrere Millionen WAAS-GPS-Empfänger für Anwendungen außerhalb der Luftfahrt im Einsatz.

4.2.1 WAAS Signal

Das WAAS-Signal, das von den geostationären Satelliten ausgesendet wird, muss verschiedene Anforderungen erfüllen [12]. Es darf z. B. nicht mit den vorhandene GPS-Satellitensignalen interferieren und es benötigt die höchstmögliche Kapazität für die Integritätsdaten und die differentiellen Korrekturen. Zusätzlich soll es von nur leicht abgeänderten GPS-Empfängern empfangen werden können.

Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, wurde binäre Phasenmodulation (*biphase shift keyed*, BPSK) als Modulationsverfahren gewählt. Die Empfangsleistung des WAAS-Signals an einer GPS-Antenne beträgt je nach Sichtbarkeitswinkel des Satelliten -161 dBW bis -157 dBW. Diese Leistung ist geringer als die Leistung der regulären GPS-Signale. Im schlechtesten Fall ist das WAAS-Signal immer noch 7 dB unter dem CDMA-bedingten Nebenrauschen (*Multiple Ac-*

cess Interference, MAI) der C/A-Code-Bandbreite. Die WAAS-Satelliten nutzen noch freie CDMA-Spreizcodes mit derselben Chiprate des GPS-Systems und interferieren somit nicht mit den GPS-Signalen. Bei der Auswahl der Codes wurde Wert darauf gelegt, dass die Kreuzkorrelation mit den Codes der GPS-Satelliten möglichst klein wird, um die GPS-Signale nicht zu stören.

Das WAAS-Signal benötigt eine Übertragungsrate von 250 bps, um Informationen in der geforderten Zeit an die Nutzer weiterzugeben. Die Fehler der Satellitenpositionen ändern sich nur langsam in der Zeit und werden deshalb lediglich alle 2-5 Minuten gesendet.

Das Datenformat der WAAS-Nachricht teilt sich in mehrere Bereiche auf:

- Schnelle Korrekturen: Diese Nachricht überträgt die sich schnell ändernden Fehler und die Integritätsinformation für jeden Satelliten. Diese Daten werden alle 6-10 s gesendet.
- Geostationäre Navigationsnachricht: Da sich die GEOs nicht so schnell bewegen wie die GPS-Satelliten, müssen die Ephemeriden-Daten nicht so oft auf den neuesten Stand gebracht werden.
- Parität: Die WAAS Fehlerkorrektur benutzt nur 24 Paritätsbits für 226 Datenbits, da sie eine effiziente Faltungscodierung nutzt. Im Vergleich dazu fügen die meisten DGPS-Stationen 24 Datenbits sechs Paritätsbits hinzu.

Jede WAAS-Nachricht ist 250 Bits lang und dauert daher eine Sekunde. Der Start des Nachrichtenblocks ist synchron zu der sechs Sekunden dauernden GPS-Zeitpoche. Jeder Datenblock besteht aus einer 8-bit Präambel, einem 6-bit langen Feld, das die Art der Nachrichten spezifiziert, 212 Datenbits und 24 Bits zur Fehlerkorrektur.

Die Integritätsinformationen enthalten ein Signal ob Satelliten zur Berechnung herangezogen werden dürfen (*use/don't use-signal*) und die Parameter σ_{UDRE} (*User Differential Range Error*) und σ_{UIVE} (*User Ionospheric Vertical Error*), welche die verbleibenden atmosphärischen Fehler und Entfernungsfehler nach Anwendung der WAD-Korrekturen schätzen. Dies ermöglicht die Bestimmung einer gesicherten Fehlergrenze für den Empfänger.

4.3 European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)

EGNOS ist ein Projekt der ESA, der europäischen Kommission und EUROCONTROL, der europäischen Organisation für Sicherheit in der Luftfahrt. Zur Zeit ist ein Prototyp als *EGNOS System Test Bed* (ESTB) aktiv. EGNOS nutzt

ebenfalls Inmarsat-Satelliten zur Kommunikation, ab 2004 wird zusätzlich der Satellit Artemis der ESA dazukommen. Seit dem 01.04.2003 wird das EGNOS-Signal in WAAS-kompatiblen Format (*SBAS mode 0/2*) ausgestrahlt. Dadurch wird die Verarbeitung der EGNOS-Korrekturen mit WAAS-fähigen GPS-Empfängern ermöglicht [7].

34 Referenzstationen (*Reference and Integrity Monitoring Station*, RIMS) in Europa werten die empfangenen GPS-Signale aus und leiten sie an vier *Master Control Stations* (MCS) weiter. Die RIMS sind vergleichbar mit den WRS des WAAS, die MCS entspricht der WMS des WAAS. Die MCS generieren den Korrekturvektor für die Integritätsinformation und die WADGPS Korrekturen. Diese Daten werden über die GEOs gesendet, womit die GPS Benutzer ihre Position unabhängig von der Entfernung zu den RIMS auf nahezu 1 m genau angeben können. Die Korrekturen für die ionosphärische Verzögerung werden für festgelegte Gitterpunkte gesendet. Die EGNOS-Entwickler legten Wert auf die Erweiterbarkeit des Systems, welche die leichte Eingliederung von Gebieten Richtung Osteuropa und Afrika ermöglicht.

4.4 Weitere SBASs

Neben WAAS und EGNOS entwickeln die Japaner noch basierend auf dem *Multi Function Transport Satellite* (MTSAT) das *MTSAT Satellite Augmentation System* (MSAS). Der erste GEO dieses Systems soll 2004 in Betrieb gehen, für 2005/2006 ist ein zweiter Satellit geplant [9]. In Kanada werden Referenzstationen aufgebaut und an das WAAS angebunden. 2006/2007 ist in Indien der Start des *GPS and GEO Augmented Navigation* (GAGAN)-Systems geplant. China entwickelt das *Satellite Navigation Augmentation System* (SNAS). Auch Brasilien und Staaten in Afrika zeigen starkes Interesse an der Entwicklung eines SBAS.

5 Nutzungsmöglichkeiten

Auch außerhalb der Luftfahrt existieren viele Anwendungsmöglichkeiten für SBASs. Beim Einlaufen von Schiffen in Häfen sind die Kapitäne zur Navigation auf Radarbilder und Funkansagen der Begleitboote angewiesen. Mit dem ESTB wurde am 02.12.2002 im Hamburger Hafen ein Wende- und Andockmanöver eines Passagierschiffes durchgeführt [8]. Durch gestapelte Container und Krane herrschen dort schwierige Bedingungen für den EGNOS-Empfang. Der Test gelang, es wurde eine Genauigkeit von 1.4m in 99.7% der Zeit erreicht.

Zur Zeit laufen Versuche, das EGNOS-Signal nicht nur über die geostationären Satelliten, sondern auch lokal über VHF-Sender und das Internet zu verteilen. Denn z. B. in städtischen Umgebungen, wo die tiefstehenden GEOs leicht durch

Häuser abgeschattet werden, ist der Empfang über alternative Kommunikationskanäle oft die einzige Möglichkeit. So arbeitet die ESA in ihrem *Terrestrial Regional Augmentation Network* (TRAN)-Projekt daran, für Flughäfen in nördlichen Breiten oder in Gegenden, in denen nur eingeschränkter Empfang der Signale der GEOs möglich ist, die EGNOS-Korrekturen über einen VHF-Sender lokal zu senden [8].

Für den Straßenverkehr bietet es sich an, die SBAS-Korrekturen über das *Radio Data System* (RDS) zu verbreiten. RDS übermittelt zusätzlich zum normalen UKW-Radioempfang Verkehrsinformationen und Zusatzdienste des jeweiligen Radiosenders. Im französischen Forschungszentrum TDF-C2R laufen zur Zeit Entwicklungen, das EGNOS-Signal durch Datenselektion und Filterung an das RDS-Datenformat anzupassen. Dadurch ergibt sich für die Nutzer im Straßenverkehr eine einfache und kostengünstige Möglichkeit für die Navigation an die EGNOS-Korrekturen auch in urbanen Gegenden zu gelangen [8].

In Städten lassen sich aufgrund von Mehrwege-Ausbreitung des GPS-Signals oft nur Genauigkeiten von 30-40m erreichen. Um z. B. blinde Personen durch Städte zu führen, ist diese Genauigkeit viel zu gering. Auch das EGNOS-Korrektursignal kann wegen Hindernissen wie Häusern oft nicht empfangen werden. Die ESA entwickelte daher das *Signal in Space through the Internet* (SISNET), das das EGNOS-Signal über das Internet und drahtlose Netzwerke verbreitet. Blinde, die mit einem tragbaren Computersystem, das eine Braille-Zeile, einen GPS-Empfänger und einen GPRS/WLAN-Zugang zum Internet beinhaltet, ausgerüstet sind, können auf diese Art durch Städte navigieren. In Spanien wurden Tests durchgeführt, die es Blinden erlaubten, ebenso durch Städte zu navigieren wie es sehende Menschen mit einer Straßenkarte tun [8].

Auch in der Landwirtschaft ergeben sich Vorteile durch die Nutzung eines SBAS. Landwirte benötigen für ihre Ernte- und Düngemaschinen präzise Positionsangaben, um große Felder in mehrere Einheiten aufzuteilen (*Precise Farming*). Zum Einen können dadurch kostenpflichtige DGPS-Korrekturen eingespart werden und zum Anderen wird die Umwelt durch exakten Düngemittelleinsatz geschont [10].

6 Interoperabilität

[13] weist auf drei Möglichkeiten der Vernetzung von SBASs hin:

- Referenzdaten-Fusion: Die MCS der jeweiligen SBASs sind miteinander verbunden und tauschen ihre Daten aus. Dem Vorteil der besten Integritätsprüfung steht die hohe benötigte Datenübertragungsrate entgegen.

- Integration im Flugzeug: Der Empfänger wertet Signale mehrerer SBASs aus. Allerdings benötigt er dazu Kenntnis über den Unterschied der Systemuhren der SBASs, wenn Pseudorange-Messungen verarbeitet werden sollen. Dieses Verfahren ist schwer zu standardisieren. Zudem überlappen sich WAAS, EGNOS und MSAS nicht.
- Satelliten-Mehrfachnutzung: Hierbei teilen sich mehrere SBASs einen GEO, der als Backup-Satellit dienen kann, falls ein primärer Satellit ausfällt.

Zur Zeit existieren keine Pläne, die SBASs miteinander zu verbinden. Allerdings treffen sich die Betreiber von WAAS, EGNOS und MSAS regelmäßig in einer *Interoperability Working Group* (IWG) um die Kompatibilität der drei Systeme zueinander zu gewährleisten. Dabei unterstützen sie die *International Civil Aviation Organization* (ICAO) und die *Radio Technical Commission for Aeronautics* (RTCA) in der Festlegung von Standards für Entwickler und Hersteller von Empfangsgeräten. Dabei entstand der *Minimum Operational Performance Standard* (MOPS) DO-229C. Empfangsgeräte, die zu diesem Standard konform sind, können das Signal jedes SBAS empfangen [9].

7 Ausblick

GPS wird ab 2004 ein zweites ziviles Signal auf der L2-Frequenz und ein drittes auf der L5-Frequenz senden, das 2009 bzw. 2012 den vollen operationellen Status erreichen soll. GALILEO wird voraussichtlich ab 2008 seinen Dienst aufnehmen. Trotz dieser Modernisierungen des GPS-Systems und der Verfügbarkeit von GALILEO werden SBASs eine wichtige Quelle differentieller und ionosphärischer Korrekturen bleiben. SBASs erhöhen auch in Zukunft die Verfügbarkeit eines globalen Satellitennavigationssystems. Die von ihnen gelieferte Integritätsinformation bleibt für sicherheitskritische Anwendungen und für das Durchführen von Cat.I-Landeanflügen von höchster Bedeutung. Neben diesem primären Einsatzgebiet eröffnen sich durch SBASs vielfältige Möglichkeiten der Verbesserung von Navigationsinformationen im Automotiv-Bereich, für maritime Anwendungen, für die Bahn und auch in im ersten Moment nicht offensichtlichen Bereichen wie der Landwirtschaft oder als Hilfe für behinderte Menschen. Der Nachteil der schlechten Sichtbarkeit der GEOs in urbanen Gegenden wird durch Projekte wie das SISNET oder die Verteilung über RDS mehr als wettgemacht, da damit SBAS-Daten ohne spezielle Empfangsgeräte für jeden zur Verfügung stehen. Die internationalen Anstrengungen zum Aufbau der SBASs und zur Standardisierung und Interoperabilität werden in der Zukunft zu einem welt-

umspannenden, hochverfügbaren und sicheren Navigationssystem führen.

Literatur

- [1] Introduction to GPS and SBAS
<http://www.marport.com/en/products/compasspoint/Intro%20to%20GPS%20and%20SBAS.pdf>
- [2] Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO
<http://www.sapos.de/pdf/4symposium/214-226.pdf>
- [3] Search and Rescue Dienst (SAR)
http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/programme/service_sar_de.htm
- [4] GALILEO Programme phases
http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/programme/phases_de.htm#3
- [5] WAAS FAQ
<http://gps.faa.gov/FAQ/faq-waas.htm>
- [6] WAAS Fact Sheets
<http://gps.faa.gov/Library/index.htm>
- [7] SBAS-Überblick
http://www.kowoma.de/gps/waas_egnos.htm
- [8] EGNOS News April 2003
http://esamultimedia.esa.int/docs/egnos/newsletters/ESTBNews_7.pdf
- [9] EGNOS News February 2003
http://esamultimedia.esa.int/docs/egnos/newsletters/ESTBNews_6.pdf
- [10] EGNOS News December 2001
http://esamultimedia.esa.int/docs/egnos/ESTBNews_3.pdf
- [11] Werner Mansfeld: *Satellitenortung und Navigation*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1998.
- [12] B. W. Parkinson, J. Spilker: *Global Positioning System: Theory and Applications Volume II*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996
- [13] Interoperation and Integration of Satellite Based Augmentation Systems
http://waas.stanford.edu/~wwu/papers/gps/PDF/interop_SBAS_raf_1998.pdf
- [14] Comparison of Real-Time Ionospheric Algorithms for a GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS). *Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 41 No. 4, 1995.